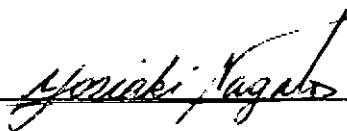


ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE OS EFEITOS DA  
RETRAÇÃO EM PEÇAS DE CONCRETO ARMADO

Rômulo Gayoso Castello Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS  
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:



YOSIAKI NAGATO

(Orientador)



ANTONIO CLÁUDIO FERRARO MAIA



CARLOS HENRIQUE HOLCK

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1983

BRANCO, ROMULO GAYOSO CASTELLO

Estudo Experimental sobre os efeitos da Retração em Peças de Concreto Armado. Rio de Janeiro, UFRJ, COPPE, 1983.

*xii*, 128 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1983).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

1. Retração I.COPPE/UFRJ. II.Título(Série).

iii

à minha esposa

à minha filha

Agradeço,

ao professor Yosiaki Nagato, pela orientação dedicada e pelo es  
tímulo dispensado durante a realização deste trabalho;

ao professor Fernando Luiz L. B. Carneiro, pelas sugestões e co  
laboração feita na realização dos trabalhos;

ao professor Newton de Castro, pela ajuda prestada no início  
dos trabalhos;

ã equipe do Laboratório de Estruturas, representado pelo seu  
chefe, professor Antonio Cláudio F. Maia, pelo apoio concedido;

ao auxiliar de pesquisa Flávio Moura Sarquis, pela ajuda efeti  
va na realização dos ensaios;

ao pessoal técnico do Laboratório de Estruturas, João, Vicente,  
Osvaldo, José Maria, Eduardo e Aguinaldo, pela colaboração pres  
tada;

ã minha esposa, Virginia Camilo da Silveira Castelo Branco, o  
constante estímulo e ajuda na correção do texto;

aos meus pais e sogros, por tudo quanto têm feito por mim;

aos meus professores do Curso de Pós-Graduação da área de Estru  
turas da COPPE;

ã Universidade Federal do Piauí, pelo apoio concedido;

a todos aqueles que, de um ou de outro modo, colaboraram para a realização deste trabalho.

## R E S U M O

O presente trabalho tem por objetivo a verificação experimental da solução teórica apresentada em [1] para o cálculo dos efeitos da retração em peças de concreto armado (tensões no concreto e na armadura e curvatura da peça).

Com esse objetivo foram confeccionadas sete peças, todas com as mesmas dimensões, sendo duas não armadas e as outras cinco armadas, tendo como parâmetros variáveis a porcentagem de armadura e sua distribuição na seção transversal. Confeccionaram-se, também, corpos de prova para controle das características do concreto ao longo do tempo.

Foram efetuadas medições de deformações específicas no concreto e na armadura. Com base na comparação dos resultados experimentais com resultados teóricos obtidos através da solução proposta em [1] são apresentadas algumas conclusões sobre aquela solução.

## S U M M A R Y

The aim of this work was to check the applicability of the solution presented in [1] for the calculation of shrinkage effects in reinforced concrete members (stresses in the concrete and in the reinforcement and curvature).

For that, seven models of the same dimensions were cast. Two of them were unreinforced and five reinforced, having as variable parameters the percentage of reinforcement and its distribution in the cross-section. Standard samples were also molded in order to determine the characteristics of the concrete along the time.

Strains were measured in the concrete and in the reinforcement. Based on comparisons between the experimental results and the theoretical ones derived from the solution proposed in [1], some conclusions related to that solution are presented.

## N O M E N C L A T U R A

$A_c$	-	área da seção transversal geométrica dos modelos
$A_s$	-	área da seção da armadura longitudinal
$A_{sem}$	-	área efetiva média das barras de aço
$E_c$	-	módulo de deformação longitudinal do concreto
$E_{cm}$	-	módulo de deformação longitudinal médio do concreto
$E_d$	-	módulo de deformação longitudinal dinâmico do concreto
$E_{dm}$	-	módulo de deformação longitudinal médio dinâmico do concreto
$E_s$	-	módulo de deformação longitudinal do aço
$E_{sm}$	-	módulo de deformação longitudinal médio do aço
$f_{cc}$	-	resistência à compressão do concreto
$f_{ccm}$	-	resistência média à compressão do concreto
$f_{ct}$	-	resistência à tração do concreto
$f_{ctm}$	-	resistência média à tração do concreto
$f_y$	-	resistência de escoamento do aço à tração
$f_{ym}$	-	resistência média de escoamento do aço à tração
$F_c$	-	resultante das tensões no concreto
$F'_s$	-	resultante das tensões na armadura
$H$	-	umidade relativa do ambiente
$h_m$	-	espessura fictícia dos modelos (CEB-70/72)



$h_o$	- espessura fictícia dos modelos (CEB - 78)
$I_c$	- momento de inércia da seção transversal de concreto em relação ao eixo baricêntrico
$U$	- perímetro
$\emptyset$	- diâmetro nominal das barras de aço
$\emptyset_e$	- diâmetro efetivo das barras de aço
$\emptyset_{em}$	- diâmetro médio efetivo das barras de aço
$\emptyset_{cs}$	- curvatura devida à retração
$\alpha_m$	- coeficiente de dilatação térmica dos modelos
$\alpha_g$	- coeficiente de dilatação térmica do gabarito
$\alpha_e$	- razão entre $E_s$ e $E_c$
$\beta$	- coeficiente
$\gamma_c$	- peso específico do concreto
$\gamma_{cm}$	- peso específico médio do concreto
$\epsilon$	- deformação específica
$\epsilon_c$	- deformação específica do concreto
$\epsilon_{cc}$	- deformação lenta específica do concreto
$\epsilon_{cs}$	- deformação específica do concreto por retração
$\epsilon_s$	- deformação específica do aço
$\lambda$	- coeficiente - CEB - 78
$\rho$	- taxa geométrica da armadura
$\sigma$	- tensão normal
$\sigma_c$	- tensão normal de tração no concreto
$\sigma_c'$	- tensão normal de compressão no concreto

- $\sigma_s$  - tensão normal de tração na armadura  
 $\sigma_s'$  - tensão normal de compressão na armadura  
 $\psi$  - coeficiente de deformação lenta  
 $\psi$  - coeficiente de relaxação

- UNIDADES -

$$1N = 0,102 \text{ Kgf}$$

$$1KN = 102 \text{ Kgf}$$

$$1N/mm^2 = 10,2 \text{ Kgf/cm}^2$$

## Í N D I C E

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO .....	2
CAPÍTULO II	- CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS .....	5
CAPÍTULO III	- CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS .....	13
	3.1. Características Geométricas.....	13
	3.2. Materiais .....	17
	3.2.1. Aço .....	17
	3.2.2. Concreto .....	20
CAPÍTULO IV	- TÉCNICA EXPERIMENTAL .....	27
	4.1. Condições Gerais de Ensaio .....	27
	4.2. Medições Superficiais .....	29
	4.3. Medições Longitudinais .....	35
CAPÍTULO V	- RESULTADOS .....	41
	5.1. Resultados Teóricos .....	41
	5.2. Resultados Experimentais .....	42
	5.2.1. Tabelas de deformações específi	
	cas .....	42
	5.2.2. Gráficos .....	61
	5.2.2.1. Deformações específicas	61
	5.2.2.2. Evolução da retração...	68
	5.2.2.3. Evolução das tensões...	75
	5.2.2.4. Evolução das curvaturas	81
	5.3. Resultados Experimentais do modelo M7..	84

CAPÍTULO VI	- ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	88
6.1.	Resultados das tabelas .....	88
6.2.	Resultados das deformações específicas.	99
6.3.	Resultados da retração .....	101
6.4.	Resultados das tensões .....	103
6.5.	Resultados das curvaturas .....	107
6.6.	Resultados do modelo M7 .....	108
CAPÍTULO VII	- CONCLUSÕES .....	111
	BIBLIOGRAFIA .....	115
	ANEXO: Ilustração Fotográfica .....	118

## CAPÍTULO I

## I - INTRODUÇÃO

A retração do concreto é um fenômeno de natureza físico-química. É uma deformação volumétrica variável ao longo do tempo e independente de qualquer tensão aplicada. As causas principais desta variação de volume, a temperatura constante, são a perda da água que não está quimicamente associada à estrutura cristalina do concreto em formação e o processo contínuo de hidratação do cimento utilizando a água livre do interior da massa de concreto.

No processo de retração de uma peça de concreto simples existem deformações diferenciais entre a periferia e o centro da peça, devido a não uniformidade da distribuição da umidade interior. Estas deformações diferenciais geram tensões auto-equilibradas no interior do concreto. A retração livre do concreto é um fenômeno complexo que envolve vários parâmetros, tais como: umidade e temperatura do meio ambiente, natureza do cimento e dos agregados utilizados na confecção do concreto, composição do concreto, condições de cura, dimensões da peça de concreto e superfície da peça exposta ao meio ambiente.

Numa peça de concreto armado a complexidade do problema aumenta porque, além dos parâmetros já referidos, entra em jogo a armadura que impede a retração livre do concreto. Surgem tensões de compressão na armadura e de tração no concreto. Estas tensões devidas à retração do concreto são auto-equilibradas e dependem da porcentagem e da distribuição da armadura na peça, sendo afetadas também pelo fenômeno da fluência do concre

to.

Existem atualmente diversas fórmulas semi-empíricas para o cálculo da retração do concreto simples ou armado , algumas delas calcadas em gráficos de origem experimental. Existem também algumas soluções para o cálculo das tensões auto-equilibradas que surgem no concreto e na armadura devido à retração. O objetivo da presente pesquisa é uma tentativa de verificação experimental de uma solução teórica desenvolvida na COPPE/ UFRJ para o cálculo destas tensões [1].

## CAPÍTULO II



## II - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

De acordo com as Recomendações CEB-FIP/70/72 [3] a deformação da retração do concreto simples ou armado é fornecida pela expressão:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_0 \cdot \beta_3 \cdot \beta_{4s} \cdot \beta_5 \cdot \beta_6$$

onde:

- $\epsilon_{cs}$  - é a deformação específica, devida à retração ao nível do centro de gravidade da armadura;
- $\epsilon_0$  - depende das condições climáticas (é função da umidade do meio ambiente e fornecida em gráfico);
- $\beta_3$  - é um coeficiente que depende da composição do concreto (dado em gráfico em função do consumo de cimento por  $m^3$  de concreto pronto e do fator água-cimento);
- $\beta_{4s}$  - é um coeficiente que depende da espessura fictícia  $h_m$  da peça (definindo-se como espessura fictícia  $h_m$  de uma peça o quociente da área  $A_c$  de sua seção transversal por seu semi-perímetro  $u/2$  em contacto com a atmosfera);
- $\beta_5$  - é um coeficiente que define o desenvolvimento da retração em função do tempo (fornecido em gráfico e dado em função da espessura fictícia  $h_m$  da peça);
- $\beta_6$  - é um coeficiente que depende da porcentagem geométrica  $\rho = \frac{A_s}{A_c}$  da armadura longitudinal  $A_s$  em relação à seção transversal da peça de área  $A_c$  e dado por  $\beta_6 = \frac{100}{100 + n\rho}$ , sendo  $n$  a relação entre os módulos de

elasticidade do aço e do concreto, podendo seu va  
lor ser tomado igual a 20, já levando em conta a in  
fluência da deformação lenta.

A nova versão CEB-FIP/78 simplifica a expressão  
acima, apresentando então a expressão seguinte para a determina  
ção da deformação específica que a retração causa ao concreto:

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

onde:

$\epsilon_s(t, t_0)$  - é a deformação específica devida à retração o  
corrida no intervalo de tempo  $(t - t_0)$ ;

$\epsilon_{s0} = \epsilon_{s1} \times \epsilon_{s2}$  é o coeficiente básico da retração:  $\epsilon_{s1}$  depen  
de das condições climáticas (sendo fornecido  
em tabela em função da umidade do meio ambien  
te);  $\epsilon_{s2}$  depende da espessura fictícia  $h_0$  da  
peça e é fornecido em gráfico (sendo, neste ca  
so, a espessura fictícia definida como .....  
 $h_0 = \lambda \frac{2Ac}{u}$ , onde  $\lambda$  é um coeficiente que de  
pende das condições climáticas, fornecido em  
tabela e dado em função da umidade do meio am  
biente);

$\beta_s$  - é um coeficiente que quantifica o desenvolvi  
mento da retração com o tempo para uma determi  
nada espessura fictícia  $h_0$  da peça, sendo for  
necido em gráfico;

$t$  - é idade da peça no momento considerado, corri  
gido de acordo com a fórmula seguinte a ser a  
presentada;

$t_0$  - é a idade do concreto no momento a partir do qual a influência da retração passa a ser considerada, corrigida de acordo com a descrição a seguir:

Correção de idade - se a peça de concreto for conservada em um ambiente com temperatura diferente de 20°C, deve-se corrigir a sua idade da seguinte forma:

$$t = \frac{1}{30} \sum_i [(T_i + 10) \Delta t_i]$$

onde:

$t$  é a idade corrigida

$T_i$  é a temperatura média diária do concreto (em °C) no intervalo de tempo  $\Delta t_i$  (em dias).

Para o cálculo teórico das deformações e tensões resultantes no concreto e na armadura, devidos à retração do concreto, utilizaremos as expressões apresentadas pelo Professor Yosiaki Nagato na bibliografia [1], na qual estas expressões são desenvolvidas para peça de concreto armado com seção transversal tendo um eixo de simetria e com armadura dupla assimétrica em relação ao centróide da seção transversal, levando em conta a fluência do concreto.

O desenvolvimento das expressões contidas na bibliografia acima referida se baseia no método geral desenvolvido pelo Professor F. L. Lobo B. Carneiro [5] para a solução de problemas relacionados ao comportamento reológico do concreto (efeitos da fluência, relaxação e retração).

O método leva a uma solução geral que admite a

utilização de qualquer função de fluência desde que se conheça a função de relaxação a ela associada.

As hipóteses assumidas no trabalho acima referido são as seguintes:

- a - hipótese das seções planas;
- b - o concreto se encontra não fissurado;
- c - existe aderência perfeita entre o concreto e a armadura;
- d - o módulo de elasticidade do concreto  $\bar{e}$  constante e igual ao módulo de elasticidade aos 28 dias de idade:

$$E_C(t) = E_{C28} = \text{CONSTANTE};$$

- e - a fluência é linear e são conhecidas:

- . função de fluência:

$$c(t_0, t-t_0) = \frac{1}{E_{C28}} [1 + \psi(t_0, t-t_0)]$$

- . função de relaxação associada:

$$r(t_0, t-t_0) = E_{C28} [1 - \Psi(t_0, t-t_0)]$$

- f - a retração é afim com a fluência e tem início na idade  $t_0$ :

$$\epsilon_{CS} = \frac{\epsilon_{CS}(\infty)}{\psi(t_0, \infty)} \cdot \psi(t_0, t-t_0)$$

- g - a solução da equação integral do tipo:

$$f(t) \cdot \alpha \cdot \psi(t_0, t-t_0) + \int_{t_0}^t \frac{df(\xi)}{d\xi} [1 + \alpha \psi(\xi, t-\xi)] d\xi = 0$$

é  $f(t) = f(t_0) [1 - \Psi_\alpha(t_0, t-t_0)]$  sendo  $f(t)$  uma função do tempo qualquer, onde

$$f(t_0) = f(t) \Big|_{t=t_0}$$

e  $\Psi_{\alpha}(t_0, t-t_0)$  é o coeficiente de relaxação associado ao coeficiente de fluência modificado:  $\propto \cdot \Psi(t_0, t-t_0)$ ;

h - existe proporcionalidade entre as variações de tensões nos dois níveis de armadura:

$$v = \frac{\sigma_{s2}(t)}{\sigma_{s1}(t)} = \frac{d\sigma_{s2}(t)/dt}{d\sigma_{s1}(t)/dt}$$

Baseado nas hipóteses acima, o desenvolvimento teórico do problema conduz às seguintes equações:

- Condições iniciais:

$$\epsilon_{s1}(t_0) = \epsilon_{s2}(t_0) = \epsilon_{c1}(t_0) = \epsilon_{c2}(t_0) = \epsilon_{cs}(t_0) = 0$$

$$\sigma_{s1}(t_0) = \sigma_{s2}(t_0) = \sigma_{c1}(t_0) = \sigma_{c2}(t_0) = \sigma_{cy}(t_0) = 0$$

- Condições de equilíbrio (variações de tensões auto-equilibradas):

$$\Delta\sigma_{c1}(t) = -[\beta_{11}\Delta\sigma_{s1}(t) + \beta_{12}\Delta\sigma_{s2}(t)]$$

$$\Delta\sigma_{c2}(t) = -[\beta_{21}\Delta\sigma_{s1}(t) + \beta_{22}\Delta\sigma_{s2}(t)]$$

- Condições de compatibilidade de deformações (aderência aço-concreto perfeita):

$$\epsilon_{c1}(t) = \epsilon_{s1}(t)$$

$$\epsilon_{c2}(t) = \epsilon_{s2}(t)$$

- Tensões na armadura e no concreto devidas à retração (níveis 1 e 2).

$$\sigma_{s1}(t) = E_s \frac{\epsilon_{cs}(\infty)}{\Psi(t_0, \infty)} \cdot \frac{1}{K_{1v}} \cdot \Psi_{\alpha 1}(t_0, t-t_0)$$

$$\epsilon_{s2}(t) = E_s \frac{\epsilon_{cs}(\infty)}{\varphi(t_0, \infty)} \cdot \frac{1}{K_{2v}} \cdot \psi_{\alpha 2}(t_0, t-t_0)$$

$$\sigma_{c1}(t) = - E_{c28} \frac{\epsilon_{cs}(\infty)}{\varphi(t_0, \infty)} \cdot \psi_{\alpha 1}(t_0, t-t_0) = - \frac{K_{1v}}{\alpha_\ell} \cdot \sigma_{s1}(t)$$

$$\sigma'_{c2}(t) = - E_{c28} \frac{\epsilon_{cs}(\infty)}{\varphi(t_0, \infty)} \cdot \psi_{\alpha 2}(t_0, t-t_0) = - v \frac{K_{2v}}{\alpha_\ell} \cdot \sigma_{s1}(t)$$

Parâmetros utilizados:

$$\alpha_\ell = \frac{E_s}{E_{c28}} : \text{relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{A_c} : \text{porcentagem geométrica da armadura no nível de } A_{s1};$$

$$\rho_2 = \frac{A_{s2}}{A_c} : \text{porcentagem geométrica da armadura no nível de } A_{s2};$$

$$i_c^2 = \frac{I_c}{A_c} : \text{raio de giração da seção transversal de concreto ao quadrado;}$$

$$\beta_{ij} = \beta_j \left( 1 + \frac{Y_i \cdot Y_j}{i_c^2} \right)$$

onde  $i = 1, 2$

$j = 1, 2$  e  $Y$  é a ordenada de uma fibra qualquer em relação ao centróide da seção transversal da peça.

$$K_{1v} = \alpha_\ell (\beta_{11} + v \beta_{12})$$

$$\alpha_1 = \frac{K_{1V}}{1+K_{1V}}$$

$$K_{2V} = \alpha_\ell \left( \frac{\beta_{21}}{V} + \beta_{22} \right)$$

$$\alpha_2 = \frac{K_{2V}}{1+K_{2V}}$$

No caso de ser adotada a função de relaxação de Trost-Neville, associada à função de fluência do CEB/FIP/1970-72, tem-se:

$$V = \frac{1+\alpha_\ell \cdot (\beta_{11} - \beta_{21}) \left[ 1+\eta_0 \varphi(t_0, t-t_0) \right]}{1+\alpha_\ell (\beta_{22} - \beta_{12}) \left[ 1+\eta_0 \varphi(t_0, t-t_0) \right]}$$

$$\frac{1}{K_{iV}} \cdot \psi_{\alpha_i}(t_0, t-t_0) = \frac{\varphi(t_0, t-t_0)}{1+K_{iV} \left[ 1+\eta_{\alpha_i} \varphi(t_0, t-t_0) \right]}$$

$$\sigma_{Si}(t) = E_S \cdot \varepsilon_{CS}(t) \cdot \frac{1}{1+K_{iV} \left[ 1+\eta_{\alpha_i} \varphi(t_0, t-t_0) \right]} = E_S \cdot \varepsilon_{CS}(t) \cdot \beta_{6,i}^*$$

$$\sigma_{Ci}(t) = - \frac{K_{iV}}{\alpha_\ell} \cdot \sigma_{Si}(t)$$

$$\varepsilon_{Si}(t) = \varepsilon_{Ci}(t) = \varepsilon_{CS}(t) \cdot \beta_{6,i}^*$$

$\beta_{6,i}^*$  corresponde ao coeficiente  $\beta_6$  das Recomendações CEB/FIP/70/72.

## CAPÍTULO III



### III - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MODELOS

O objetivo da pesquisa é a determinação experimental dos efeitos da retração em peças de concreto armado (tensões no concreto e na armadura e curvatura da peça) e a comparação dos resultados experimentais com resultados teóricos disponíveis. Para tal estudo foram concretados sete peças (modelos), sendo duas não armadas e as outras cinco armadas, variando-se a taxa geométrica e a distribuição das armaduras. Além dos modelos confeccionaram-se 108 corpos de prova cilíndricos para controle das características do concreto ao longo do tempo.

#### 3.1. Características Geométricas

Na figura III.1. tem-se uma vista geral das características geométricas dos modelos.

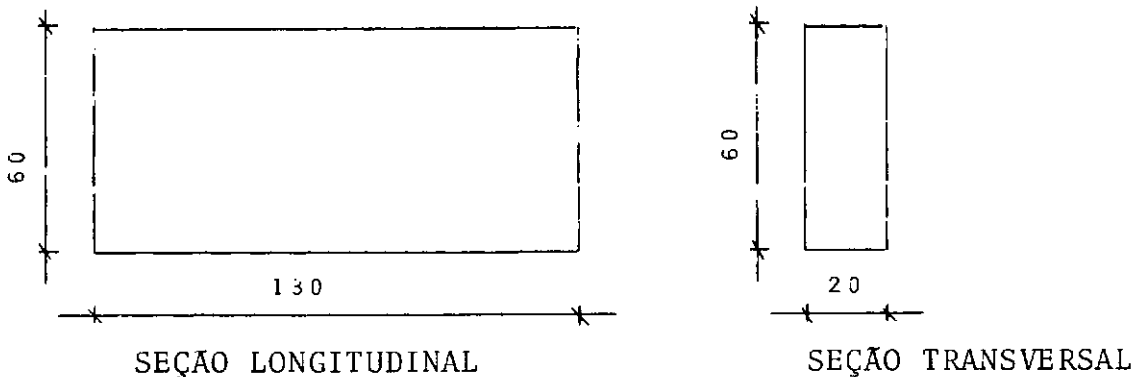
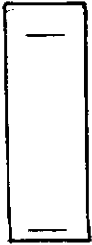


Fig. III.1. Dimensões dos Modelos (cotas em cm)

No quadro III.1. são apresentados todos os modelos com suas respectivas porcentagem e distribuição de armadura longitudinal.

QUADRO III

MODELO	DESIGNAÇÃO	A <sub>s1</sub>		A <sub>s2</sub>		%	OBSERVAÇÕES
		QØ(mm)	%	QØ(mm)	%	TOTAL	
M1	CAS	6Ø19,0	1,43	2Ø4,8	0,03	1,46	 SEC. TRANSV. ESTRIBOS: 4,8-c.10 AÇO ESPECIAL: CA-50A
M2	CADA	6Ø22,2	1,94	3Ø22,2	0,97	2,91	
M3	CADS	6Ø22,2	1,94	6Ø22,2	1,94	3,88	
M4	CAP1	18Ø22,2 ARMADURA DISTRIBUIDA NO PERÍMETRO				5,81	
M5	CAP2	24Ø22,2 ARMADURA DISTRIBUIDA NO PERÍMETRO				7,74	
M6	SAAN	SEM ARMADURA EM AMBIENTE NORMAL				-	-
M7	SAAS	SEM ARMADURA EM AMBIENTE SATURADO				-	

No quadro III.1. tem-se os modelos identificados pela numeração de 1 a 7 e, para uma caracterização deste, tem-se também uma designação correspondente, ou seja:

MODELO M1 - CAS : COM ARMADURA SIMPLES

MODELO M2 - CADA : COM ARMADURA DUPLA ASSIMÉTRICA

MODELO M3 - CADS : COM ARMADURA DUPLA SIMÉTRICA

MODELO M4 - CAP1 : COM ARMADURA PERIMETRAL-1

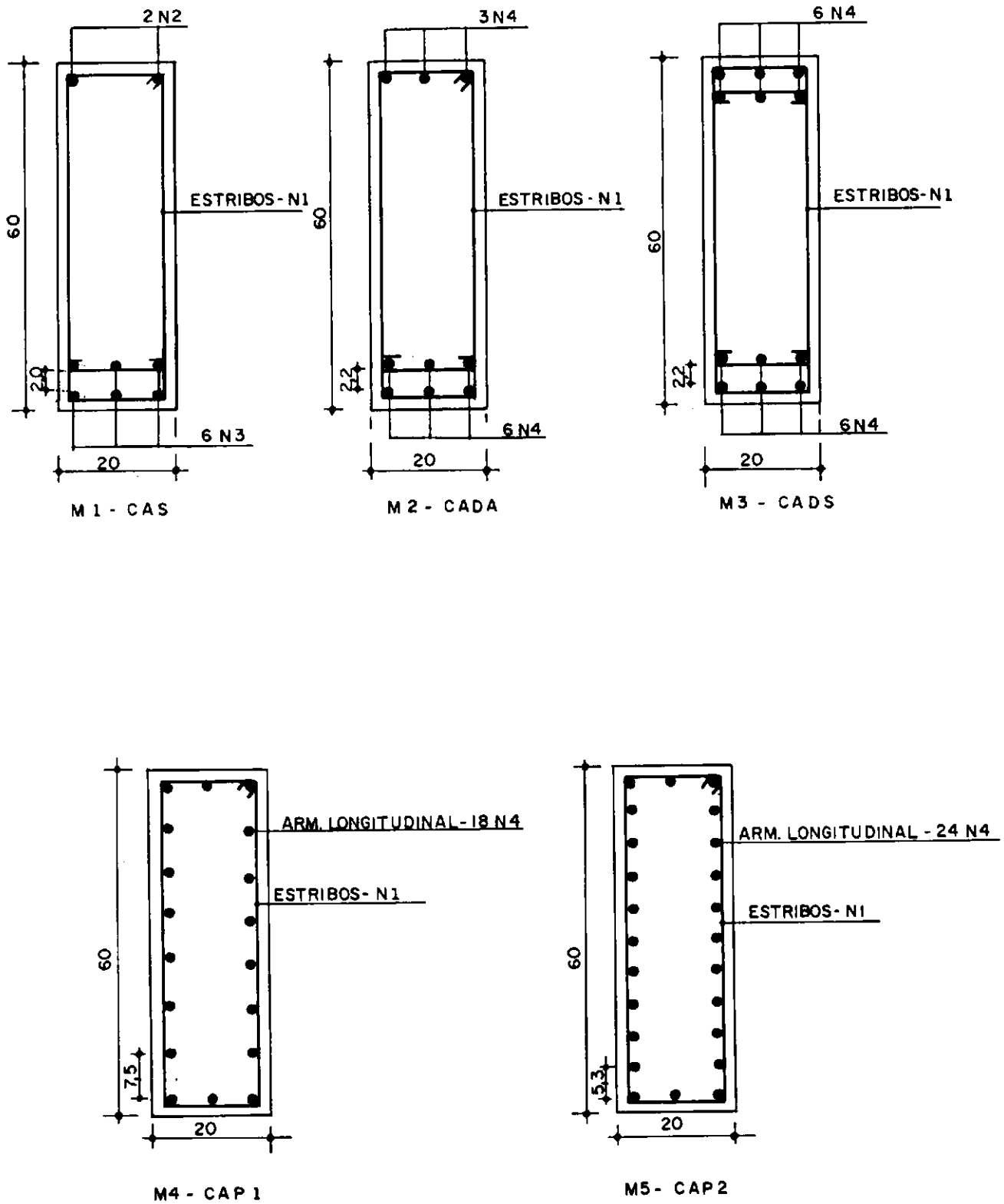
MODELO M5 - CAP2 : COM ARMADURA PERIMETRAL-2

MODELO M6 - SAAN : SEM ARMADURA EM AMBIENTE NORMAL

MODELO M7 - SAAS : SEM ARMADURA EM AMBIENTE SATURADO

Na figura III.2. seguinte encontra-se a distri  
buição desta armadura longitudinal nas seções transversais dos  
modelos.

A armadura transversal dos modelos constou de es  
tribos de 4,8 mm de diâmetro colocados a cada 10 cm, com um re  
cobrimento de 2 cm.



N1 - 14  $\phi$  4.8 mm - C.10  
 N2 -  $\phi$  4.8 mm  
 N3 -  $\phi$  1.9 mm  
 N4 -  $\phi$  22.2 mm

FIG. IIL 2 DETALHES DAS ARMADURAS DOS MODELOS (COTAS EM CENTÍMETRO)

### 3.2. Materiais

#### 3.2.1. Aço

Utilizou-se o aço especial CA-50A, tanto para a armadura longitudinal como para a armadura transversal.

Realizaram-se ensaios de tração (segundo o método Brasileiro MB-4) de amostras retiradas das barras dos lotes recebidos, sendo cada lote caracterizado em função do diâmetro nominal das barras: lote nº 1 com barras de  $\varnothing = 19 \text{ mm}$  e lote nº 2 com barras de  $\varnothing = 22,2 \text{ mm}$ . Para o lote nº 1 fizeram-se 4 ensaios de tração e para o lote nº 2, 10 ensaios de tração.

Como as tensões que surgem nas armaduras dos modelos são baixas, considerou-se desnecessária a identificação das barras utilizadas em cada modelo. Portanto apresentam-se somente os valores médios dos resultados dos ensaios por lote, os quais representarão as características de toda a armadura usada. Na Tabela III.1. tem-se essas características dos aços, onde encontram-se os valores médios para o diâmetro e seção efetivos das barras, a partir do peso por unidade de comprimento de cada barra e do peso específico do aço ( $78,5 \text{ KN/m}^3$ ) e os respectivos valores médios da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade das barras

TABELA III.1. - Características do aço

TIPO DE AÇO	LOTE	$\varnothing_{em}(\text{mm})$	$A_{sem}(\text{cm}^2)$	$f_{ym}(\text{N/mm}^2)$	$E_{sm}(\text{KN/mm}^2)$
CA-50A	1	18,7	2,74	546	220
	2	22,2	3,86	557	207

Como os valores médios dos módulos de elasticidade  $E_{sm}$  para cada lote diferiram pouco entre si, tomou-se como valor característico para todas as barras o valor usual .....  
 $E_s = 210 \text{ KN/mm}^2$ .

Apresenta-se na figura III.3. os diagramas tensão-deformação encontrados para uma determinada amostra de cada um dos lotes, tendo-se utilizado na obtenção destes diagramas um extensômetro eletrônico acoplado à prensa hidráulica de ensaaios Amsler.

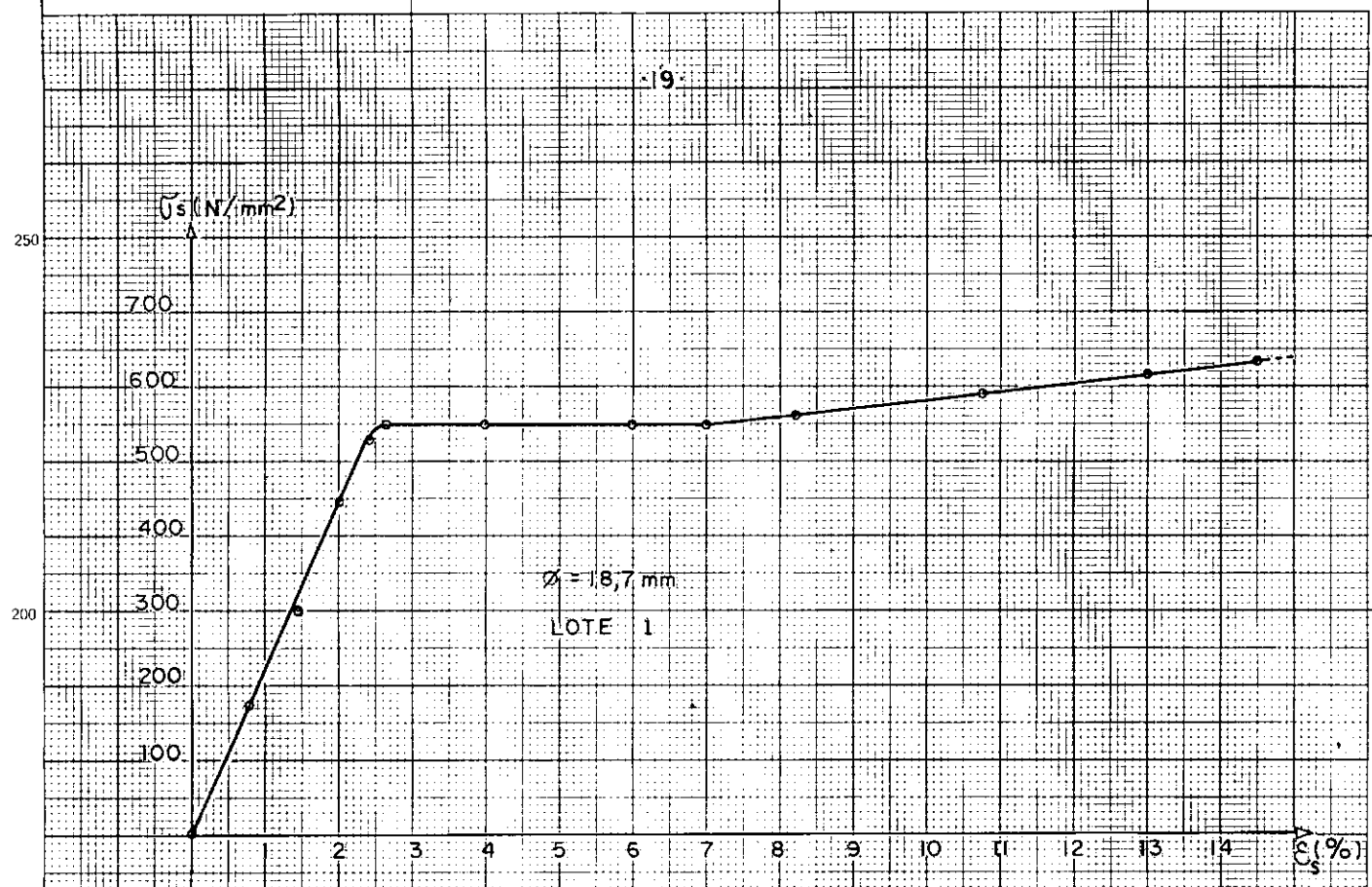


FIG. III-3a - CURVA TENSÃO - DEFORMAÇÃO DO AÇO

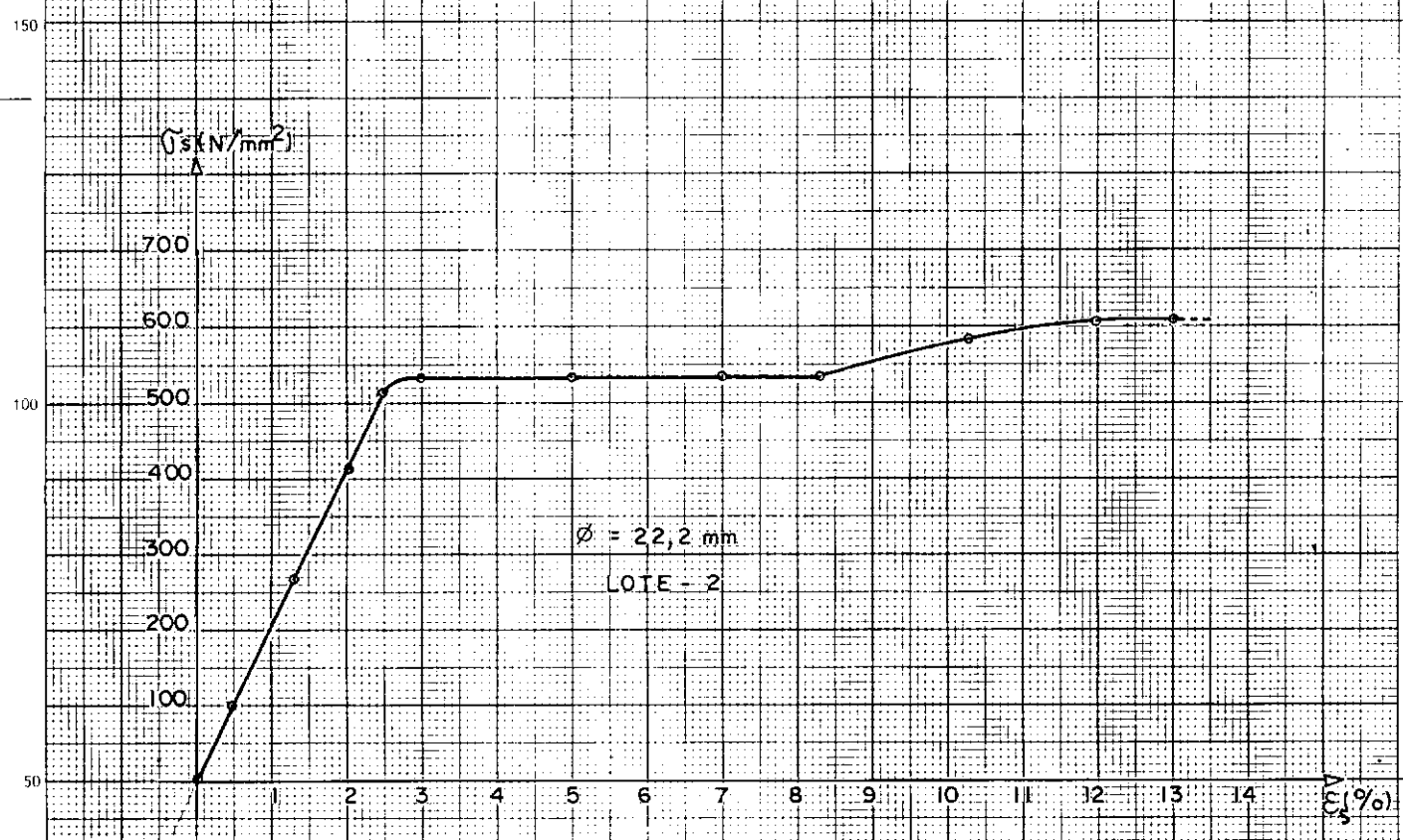


FIG. III-3b - CURVA TENSÃO - DEFORMAÇÃO DO AÇO

### 3.2.2. Concreto

Foi utilizado concreto com traço em peso de:

1 : 2,6 : 2,9

Fator água-cimento:  $a/c = 0,60$

Consumo de cimento por metro cúbico de concreto pronto:  $C = 334 \text{ kg/m}^3$ .

Os componentes utilizados foram:

- Cimento tipo Portland Normal, marca Barroso - CP320
- Agregado miúdo: (areia grossa):
  - . Diâmetro máximo = 4,8 mm
  - . Módulo de finura = 3,2
- Agregado graúdo (brita nº 01):
  - . Diâmetro máximo = 19,0 mm
  - . Módulo de finura = 6,8

Na figura III.4. tem-se a determinação das porcentagens dos agregados e do cimento na mistura pelo processo gráfico [9] baseado nas curvas granulométricas dos agregados (determinadas de acordo com as exigências dos métodos e especificações Brasileiros: MB-7 e EB-4) e utilizando-se a curva de referência da mistura sugerida pelo Professor F. L. Lobo B. Carneiro [10] .

Na figura III.5. apresenta-se a curva granulométrica da mistura cimento-agregados para um melhor conhecimento da mistura final dessas matérias primas.

A concretagem dos modelos foi feita em três etapas distintas:



Na primeira etapa concretaram-se os modelos M1, M2 e M3;

Na segunda etapa concretaram-se os modelos M4, M5 e M6;

E por último concretou-se o modelo M7 (SAAS).

Para cada etapa confeccionaram-se 36 corpos de prova cilíndricos (altura 30 cm e diâmetro da base 15 cm), totalizando 108 corpos de prova.

Ensaaiaram-se estes corpos de prova nas idades de 7, 28, 90, 180 e 440 dias. Em cada uma das idades de ensaio executaram-se três ensaios de compressão diametral (resistência à tração simples, segundo as especificações do MB-212) e três de resistência à compressão simples (segundo MB-3). Para estes seis corpos determinou-se o módulo de elasticidade dinâmico e para os três corpos de prova ensaiados à compressão simples determinou-se também o módulo de elasticidade estático.

Na determinação do módulo de deformação longitudinal dinâmico, empregou-se a fórmula abaixo:

$$E_d = (2.h.f.)^2 \cdot \gamma \cdot 10^{-6}$$

onde:

$E_d$  - módulo de deformação longitudinal dinâmico  
(N/mm<sup>2</sup>)

$h$  - altura do C. P. (mm)

$f$  - frequência natural de vibração (KHz)

$\gamma$  - massa específica (kg/m<sup>3</sup>)

E na obtenção do módulo de elasticidade estático seguiu-se a recomendação da RILEM-CPC8 e utilizou-se um compressômetro acoplado ao corpo de prova ensaiado na prensa hidráulica.

dráulica Amsler.

Estes valores foram comparados com o do CEB/FIP-1970/72 na sua recomendação R.12.222 onde o módulo de deformação longitudinal secante é dado, para concreto de agregados normais, por:

$$E_{cj} = 0,9 (6.600 \sqrt{f_{ccj}})$$

onde:

j é a idade do C. P. ensaiado e

$E_{cj}$  e  $f_{ccj}$  são dados em  $N/mm^2$

Na tabela III.2. apresentam-se os resultados médios desses ensaios e na figura III.6. são dadas as curvas tensão-deformação (deformações longitudinal e transversal) de dois corpos de prova.

Com finalidade de caracterizar a consistência do concreto, para cada etapa de concretagem, foram feitos 4 ensaios de abatimento (Cone de Abrams), totalizando 12 ensaios. Obteve-se como valor médio de abatimento 3 cm, ficando, assim, o concreto caracterizado por uma consistência plástica.

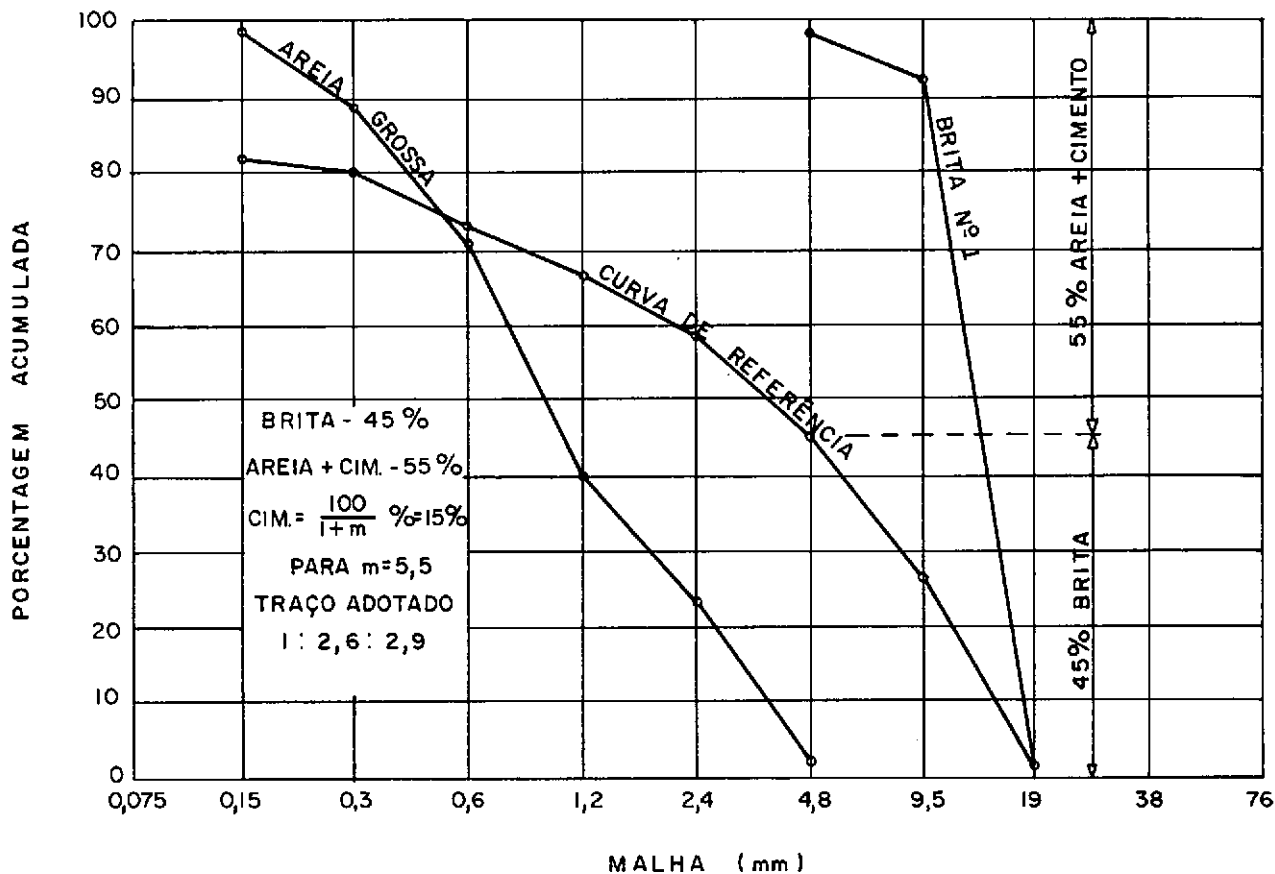


FIGURA -III4 - DETERMINAÇÃO GRÁFICA DAS PORCENTAGENS

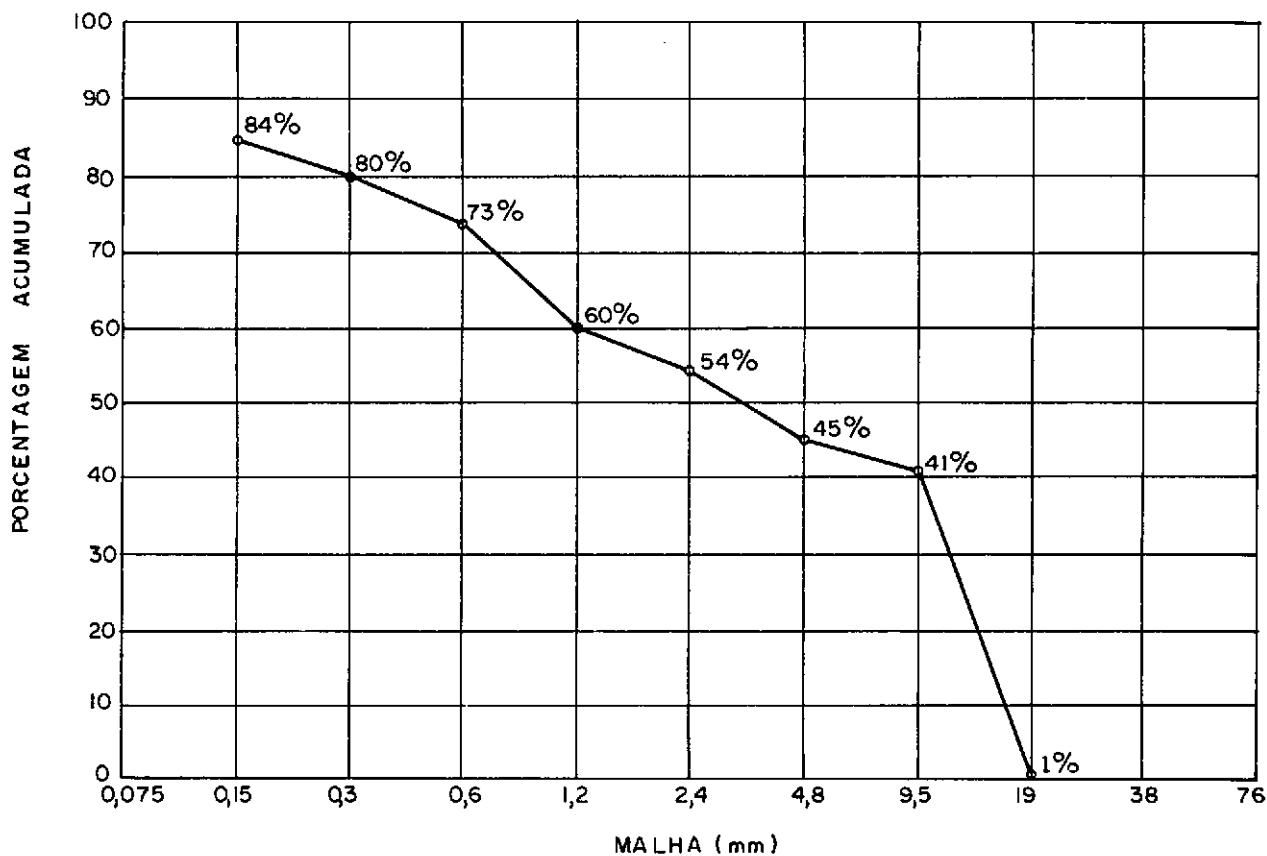


FIGURA III.5 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA CIMENTO AGREGADOS

TABELA III.2. - RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA

MODELO	ETAPA DE CONCRETAGEM	IDADE (DIAS)	$\gamma$ cm ( $t/m^3$ )	$f_{ccm}$ ( $N/mm^2$ )	$f_{ctm}$ ( $N/mm^2$ )	$E_{dm}$ ( $N/mm^2$ )	$E_{cm}$ ( $N/mm^2$ )	$E_{cm-CEB}$ ( $N/mm^2$ )
M1  M2  M3	1	7	2,3	21,2	1,9	35.600	31.400	27.400
		28	2,3	29,4	2,6	35.900	36.900	32.200
		90	2,3	35,1	2,7	36.600	35.200	35.200
		180	2,3	32,9	2,8	36.400	35.300	34.000
		440	2,3	40,0	2,9	35.500	30.800	37.900
M4  M5  M6	2	7	2,3	20,2	2,1	33.700	30.300	26.700
		28	2,3	30,7	2,8	35.400	35.000	32.900
		90	2,3	32,9	2,7	35.700	32.700	34.100
		180	2,2	33,5	2,4	35.100	43.600*	34.400
		440	2,3	38,5	2,8	35.000	28.000	36.800
M7	3	7	2,3	22,7	2,2	34.800	27.000	28.300
		28	2,3	27,8	2,4	37.900	34.700	31.300
		90	2,3	29,1	2,4	39.300	50.000*	32.000
		180	2,3	32,7	2,5	40.800	29.000	34.000
		440	2,3	38,0	2,8	40.600	30.000	36.600

\* Valores desprezados

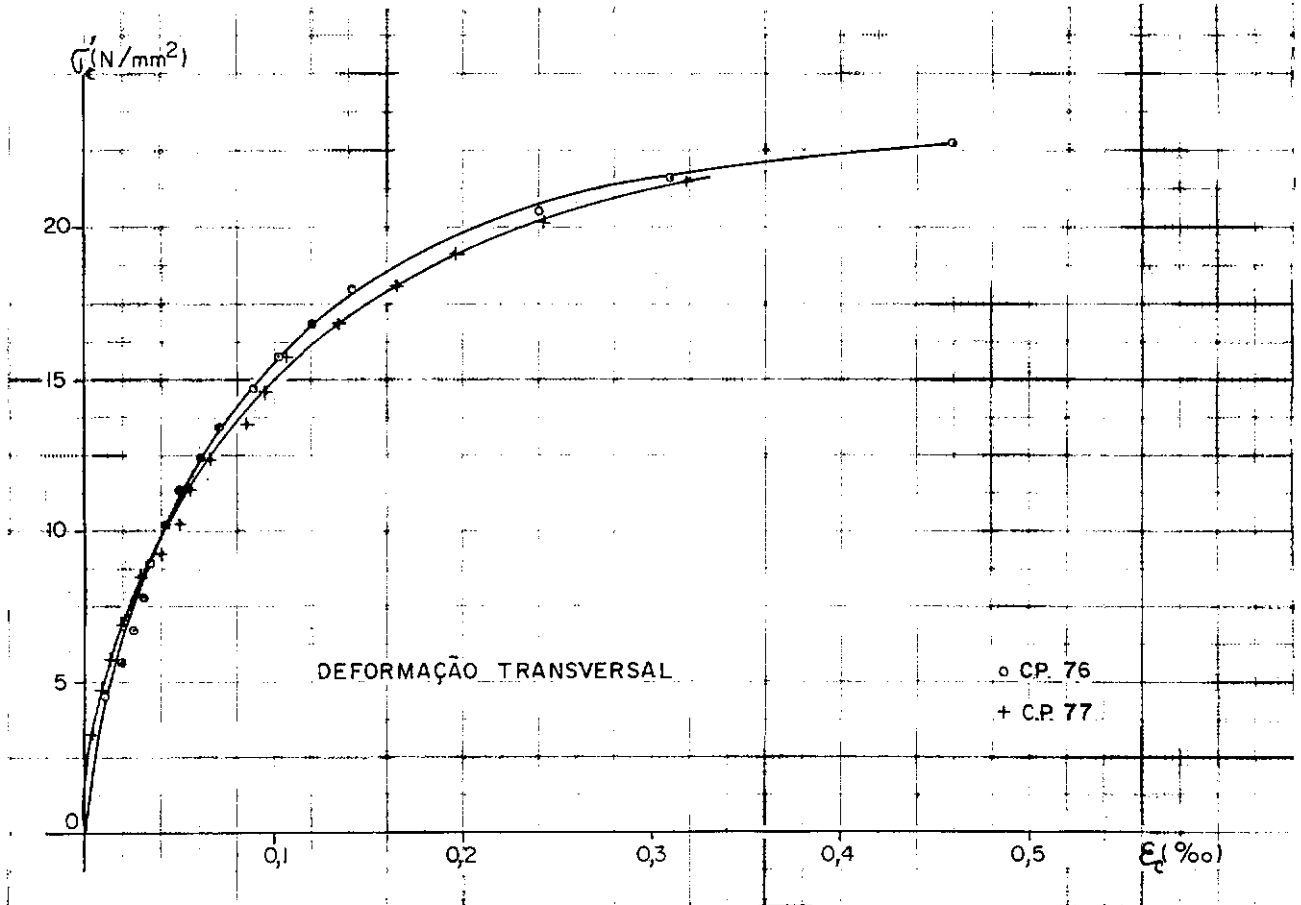
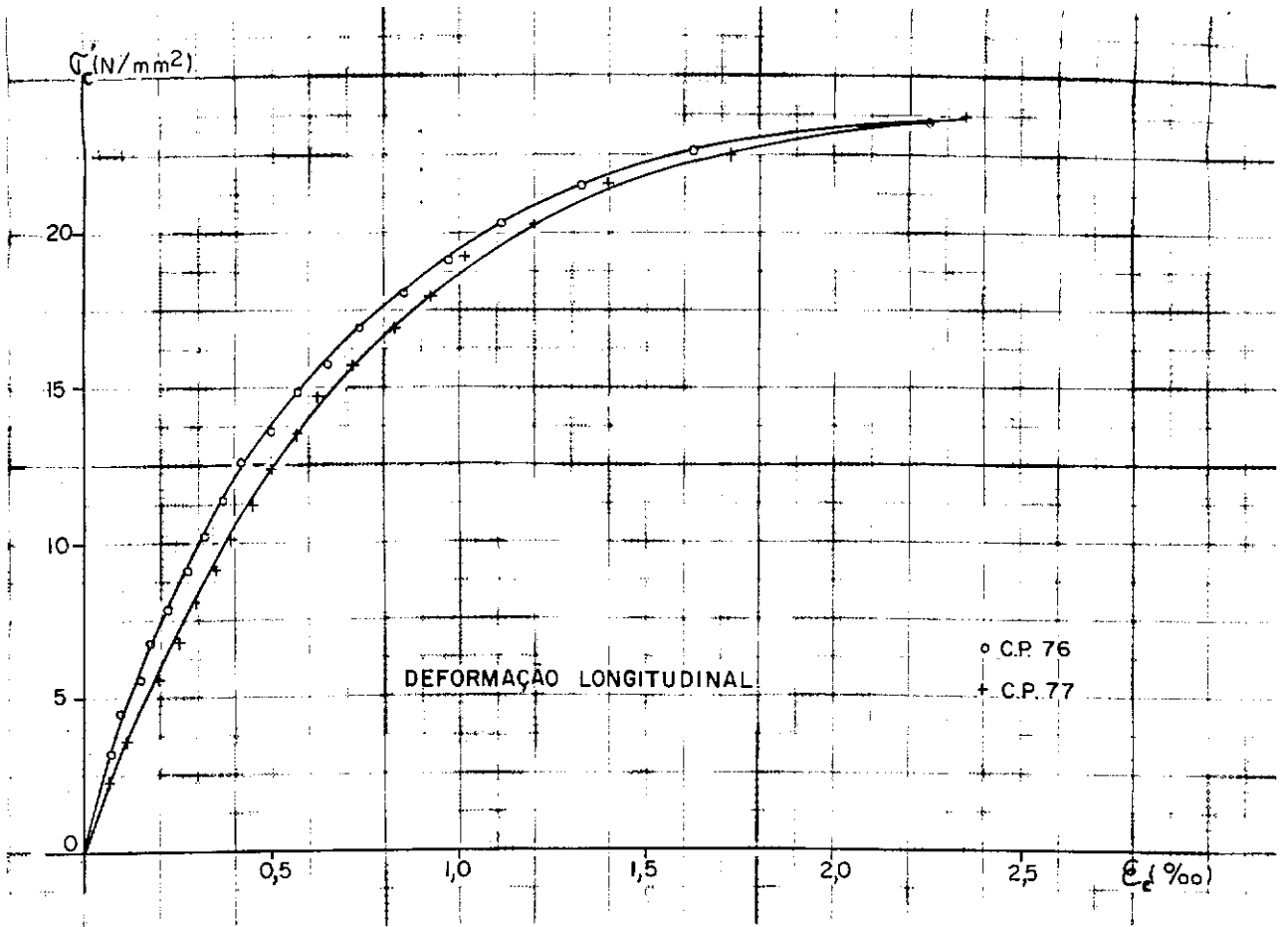


FIG.III.6. Curvas Tensão-deformação do concreto longitudinal e transversal)

## CAPÍTULO IV

## IV - TÉCNICA EXPERIMENTAL

### 4.1. *Condições gerais de Ensaio*

Depois de realizada a concretagem dos modelos , estes foram mantidos durante 7 dias no interior das fôrmas e estas sendo constantemente molhadas, como também se manteve uma camada de areia úmida sobre a face superior dos modelos durante este período (período de cura). Registrou-se uma temperatura média ambiental de 20°C e uma umidade relativa média de 80% durante este período.

Após a cura dos modelos processou-se a desforma e o transporte destes para os respectivos locais de ensaio. Com exceção do modelo M7 (SAAS), os demais foram colocados no subsolo da placa de reação do Laboratório de Estruturas do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, mas sem condições de controle da temperatura e da umidade relativa do ambiente, medidas periodicamente.

O modelo M7 (SAAS) foi colocado dentro de uma caixa d'água, ficando totalmente imerso em água.

Durante o período de cura dos modelos os corpos de prova cilíndricos foram mantidos imersos em água e em seguida colocados em iguais condições de meio ambiente com relação aos seus respectivos modelos. Os corpos de prova do modelo M7 continuaram imersos em água após o período de cura e os demais foram colocados ao lado dos modelos (no subsolo da placa de reação).

Para servir de apoio aos modelos que ficaram sob a placa de reação, executou-se para cada modelo uma base de alvenaria. Os modelos foram colocados sobre estas, apoiados em um lençol de borracha (Fig. IV.1.). A borracha tem por finalidade permitir a retração do concreto e a perda de umidade na face de apoio dos modelos, e as bases de alvenaria, com uma altura de 75 cm, facilitar a medição de deformação nos modelos.

As faces das extremidades dos modelos foram parafinadas (Fig. IV.1.) para simular a condição de continuidade dos modelos quanto à perda de umidade (a parafina impede a perda de umidade pelas extremidades).

Quanto ao modelo M7 (imerso em água), este simplesmente foi colocado apoiado sobre o lençol de borracha, para permitir a expansão do concreto, dentro da caixa d'água e não teve suas extremidades parafinadas. Também para este modelo não se teve controle da temperatura de água, a qual anotou-se periodicamente.

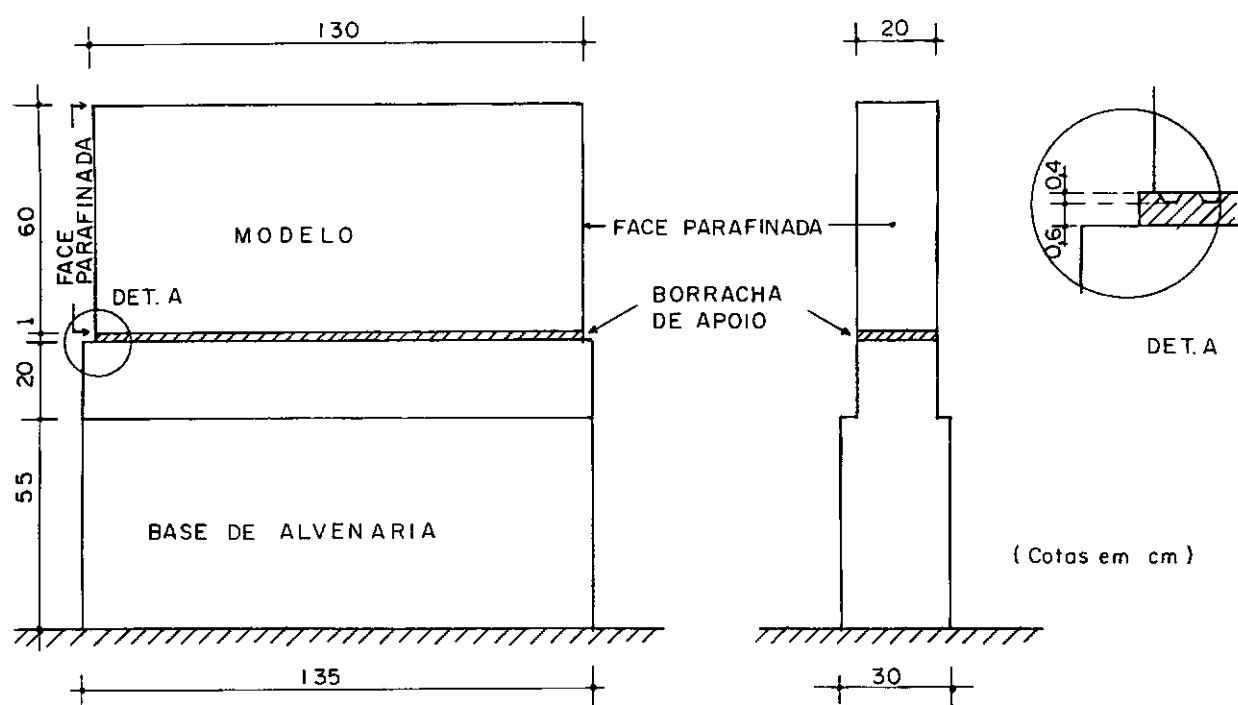


FIG. IV.1. Esquema de montagem de ensaio



#### 4.2. *Medições Superficiais*

Fizeram-se medições de deformações específicas longitudinais nas superfícies laterais dos modelos, com extensômetros mecânicos Huggenberger: um Tensotast com base de medição de 10 cm e um Defômetro D250 com base de medição de 25cm, ambos com sensibilidade de 0,001 mm.

As bases de apoio dos extensômetros foram dispostas identicamente nas duas faces laterais dos modelos. Nas figuras IV.2. e IV.3. apresenta-se a colocação destas bases de apoio dos extensômetros nas faces laterais dos modelos.

Com esta disposição das bases, ficaram definidos 35 pontos de medição de deformação específica superficial longitudinal em cada face dos modelos M1 e M2 (Fig. IV.4.) e 28 pontos de medição em cada face para os modelos M3, M4, M5, M6 e M7, (Fig. IV.5.) considerando como ponto de medição o ponto médio da base de medição correspondente.

Para todos os modelos, na seção vertical SV1 a base de medição é de 10 cm, sendo de 25 cm nas demais seções verticais.

Os pontos de medição da face direita  $D_i$  e  $D_{si}$  são simétricos aos pontos de medição correspondentes da face esquerda:  $E_i$  e  $E_{si}$ . Além desta simetria transversal existe uma simetria longitudinal parcial: os pontos  $E_{Si}$  e  $D_{Si}$  são simétricos aos pontos  $E_i$  e  $D_i$ , respectivamente.

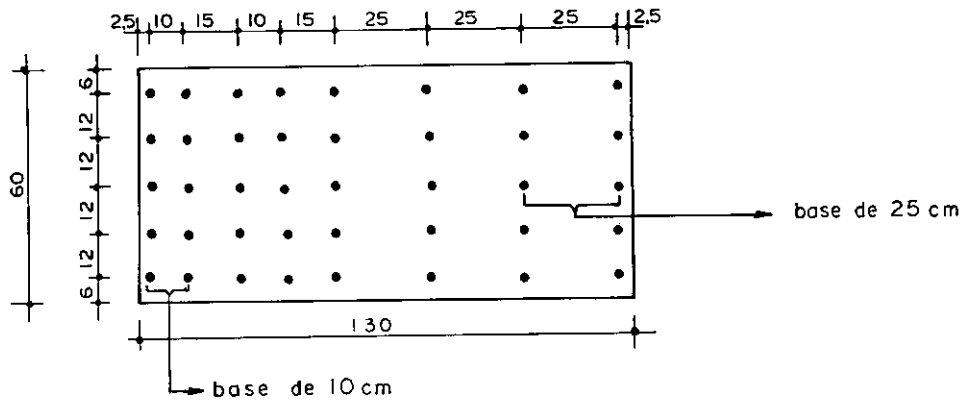


FIG. IV.2. - Esquema de Disposição das Bases de Apoio dos Extensômetros Mecânicos para os modelos: M1(CAS) e M2(CADA).

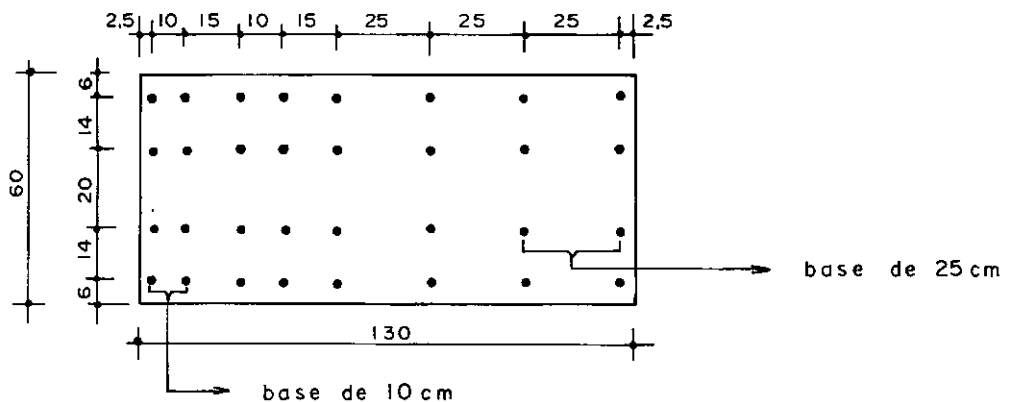


FIG. IV.3. - Esquema de Disposição das Bases de Apoio dos Extensômetros Mecânicos para os modelos: M3(CADS), M4(CAP1), M5(CAP2), M6(SAAN) e M7(SAAS).

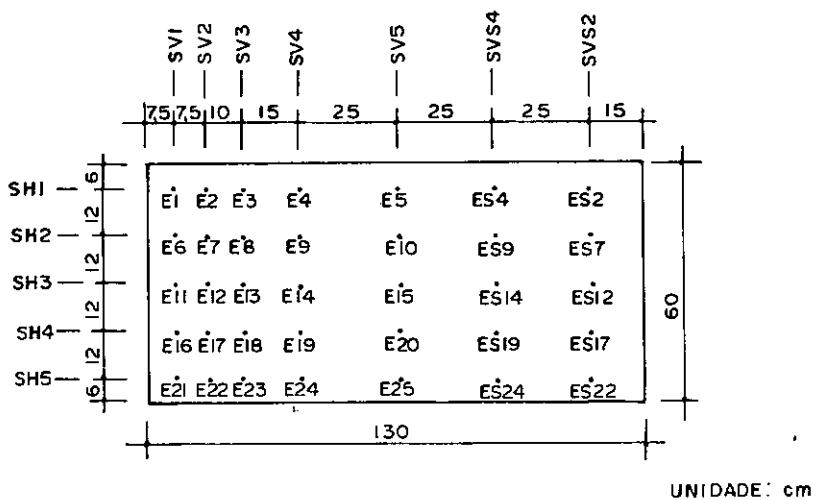


FIG. IV.4. - Pontos de medição da face esquerda dos modelos M1 e M2.

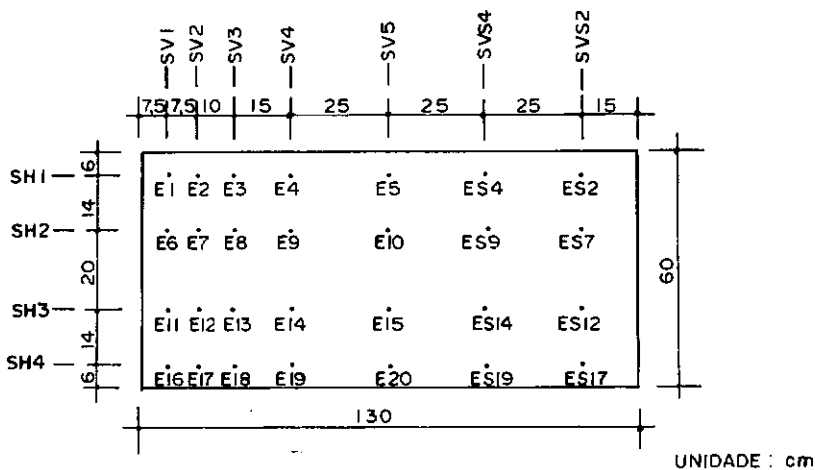


FIG. IV.5. - Pontos de medição da face esquerda dos modelos M3, M4, M5, M6 e M7.

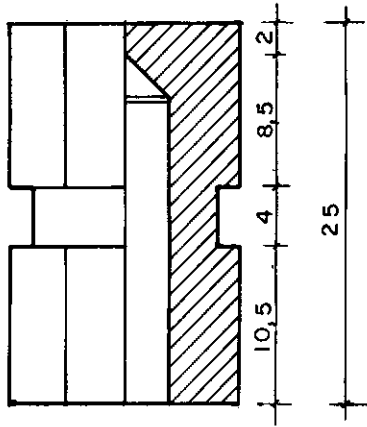
As bases de apoio dos extensômetros foram executadas inicialmente com referências de latão chumbadas nos modelos durante a concretagem. Na figura IV.6. têm-se estas bases em detalhe e os parafusos de fixação das referências às fôrmas durante a concretagem e de apoio dos extensômetros.

REFERÊNCIA CHUMBADA NO CONCRETO

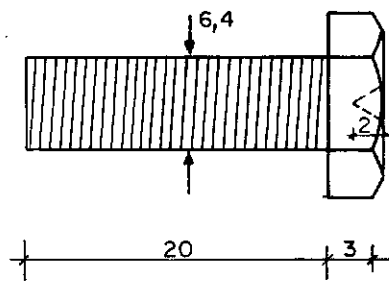
PARAFUSOS:

Nº 01 - DE FIXAÇÃO DAS REFERÊNCIAS

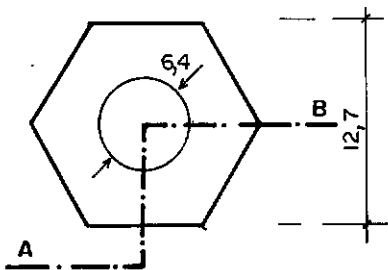
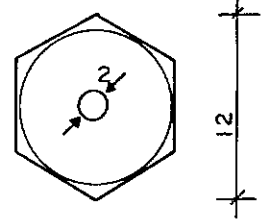
Nº 02 - DE APOIO DOS EXTENSÔMETRO



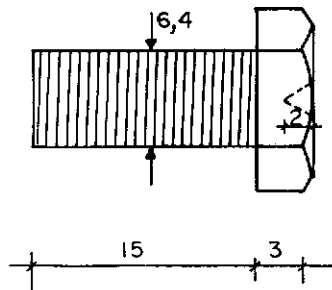
CORTE A - B



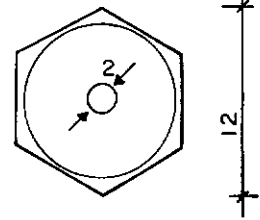
PARAFUSO Nº 01



ESC. 2:1



PARAFUSO Nº 02



(COTAS EM mm)

FIG. IV.6. - Detalhe das referências chumbadas e dos parafusos de fixação das referências e de apoio dos extensômetros.

Antes da concretagem estas bases foram fixadas nas faces laterais das fôrmas por meio de parafusos (nº 1, apresentado na figura IV.6.), para o que se fez necessário furar, nas posições pré-estabelecidas e marcadas nas fôrmas, todas as

faces laterais num diâmetro de 1/4 (diâmetro do parafuso). Na foto nº 1 têm-se uma visão geral destas bases fixadas em uma determinada fôrma.

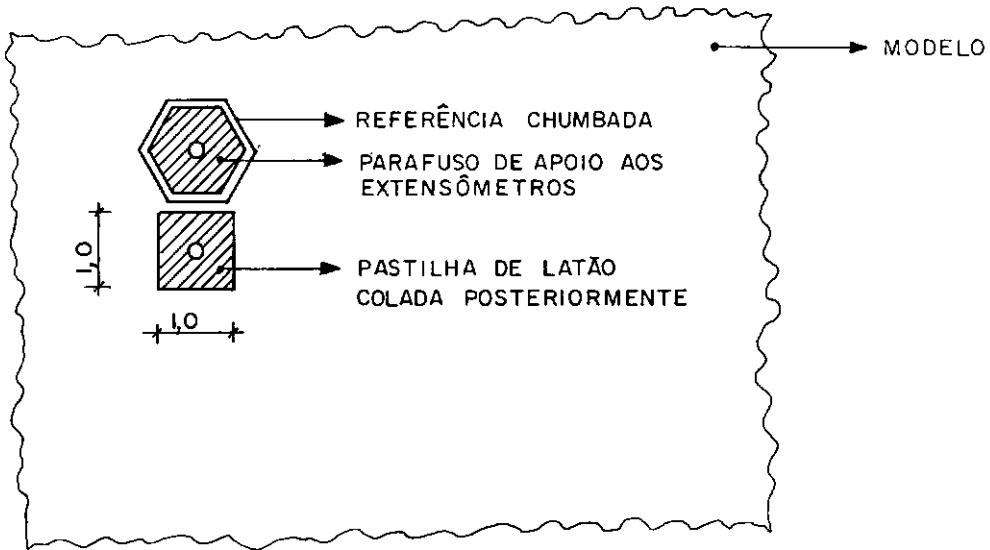
Após a concretagem e cura dos modelos, retiraram-se estes parafusos (nº 1) e em seguida as fôrmas. Desformados os modelos colocaram-se os parafusos nº 2 (mostrado na figura IV.3) de apoio dos extensômetros.

Posteriormente estas peças foram substituídas por pastilhas de latão coladas no concreto, em virtude de terem surgido com o decorrer do tempo, em torno das peças chumbadas, fissuras superficiais que provocaram o afrouxamento das peças. Estas fissuras apresentam uma direção predominante na horizontal, devido na direção vertical termos uma retração livre. Na figura IV.7. têm-se o detalhe do posicionamento das pastilhas nos modelos e uma visão do aspecto da fissuração ocorrida em torno das peças de apoio aos extensômetros, a título de ilustração. No anexo referente a Ilustração Fotográfica apresentam-se fotografias que mostram o aspecto de fissuração surgida.

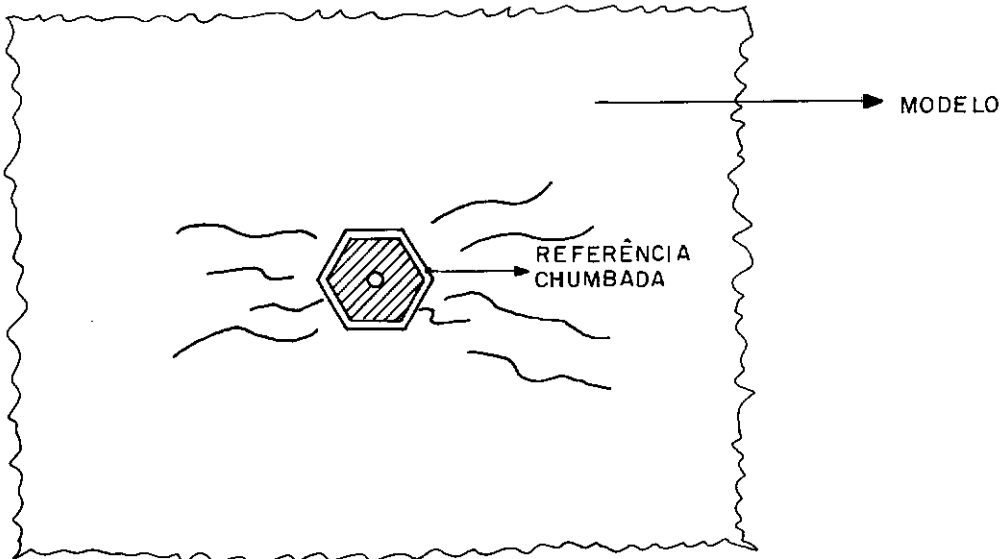
Vale salientar que esta troca de bases de apoio executou-se logo que se verificou a ocorrência de algumas bases soltas no modelo M6 (modelo sem armadura em ambiente normal, tendo uma retração bem maior que os demais). Mas observou-se que com o passar do tempo este afrouxamento ocorreu para algumas bases dos outros modelos, o que não apresentou problema porque a esta altura já se trabalhava inteiramente nas bases de pastilhas.

O modelo M7 (imerso em água) não sofreu este problema de afrouxamento das suas bases de forma que continuou-se

com as medições nestas bases.



a) DETALHE DO POSICIONAMENTO DA PASTILHA NO MODELO  
ESCALA. 1:1



b) FISSURAÇÃO OCORRIDA NO CONCRETO

FIG. IV.7. - Detalhe do posicionamento da pastilha de latão no modelo (a) e fissuração ocorrida no concreto adjacente à referência de latão chumbada (b).

#### 4.3. *Medições Longitudinais*

Foram feitas medições de deformações longitudinais totais nas extremidades das barras de aço e no concreto , utilizando-se de um defômetro com base de medição de 1312 mm e sensibilidade de 0,001 mm, fabricado especialmente para estas medições longitudinais.

Este defômetro foi construído com 2 tubos de aço inoxidável com diâmetro externo de 26,9 mm e interno de 22,9 mm (espessura da parede do tubo de 2 mm), formando uma estrutura rígida, tendo em uma de suas extremidades uma ponta fixa de apoio e na outra um defletômetro de haste para leituras (com sensibilidade de 0,001 mm). Este defletômetro foi fixado nesta extremidade por meio de um parafuso, o qual possui um apoio regulável com um curso de posicionamento de 25 mm. Colocou-se também, nesta extremidade um nível de bolha para fins de oferecer um posicionamento de leitura sempre nivelado (leitura na mesma posição). Na foto nº 6 tem-se uma visão ilustrativa deste defômetro.

Construiu-se também um gabarito para este defômetro. Este gabarito consta simplesmente de um tubo em aço inoxidável (idêntico ao tubo empregado no defômetro), tendo nas suas extremidades peças de apoio iguais às utilizadas para as leituras longitudinais dos modelos. Em uma das extremidades do tubo soldou-se a peça de apoio diretamente ao tubo e na outra soldou-se a peça a um outro tubo em aço inoxidável de diâmetro externo menor do que 22,9 mm, obtendo-se desta forma um encaixe entre tubos tipo cursor, de maneira que se pode fazer uma gradação no comprimento do gabarito, de apoio a apoio. Durante

toda a pesquisa trabalhou-se com o gabarito com uma graduação constante inicialmente estabelecida de 1312 mm (base do defômetro).

A figura IV.8. (a e b) descreve a construção do defômetro e do seu gabarito, respectivamente.

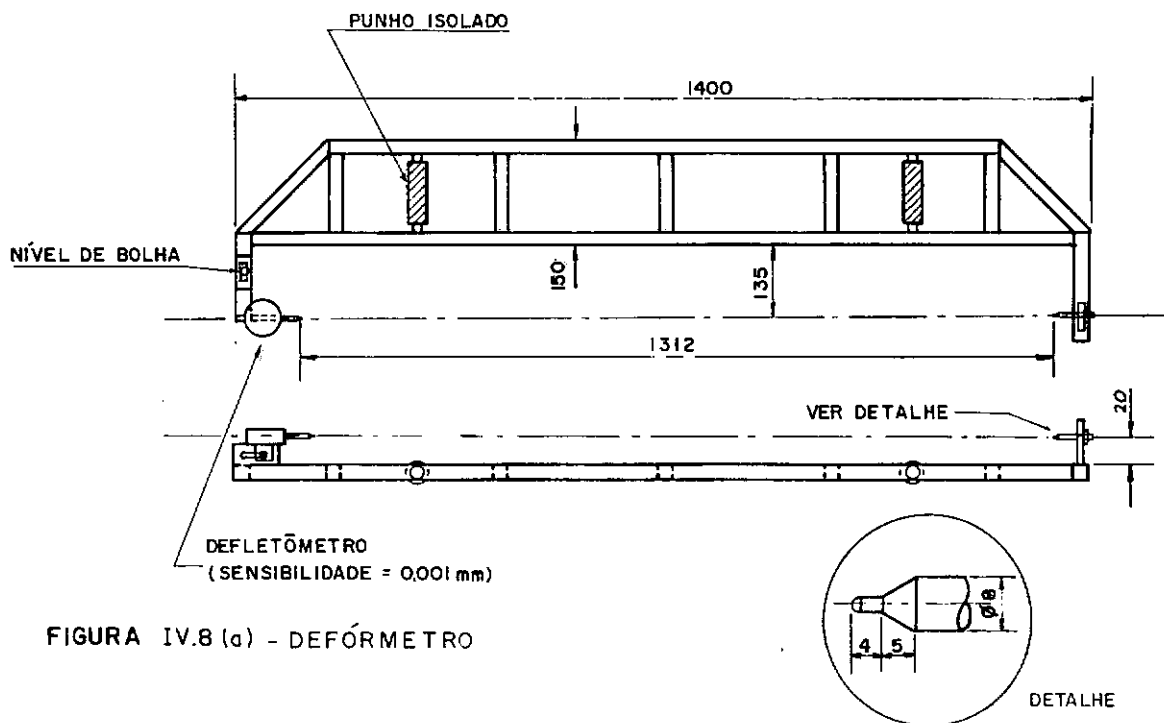


FIGURA IV.8 (a) - DEFÔMETRO

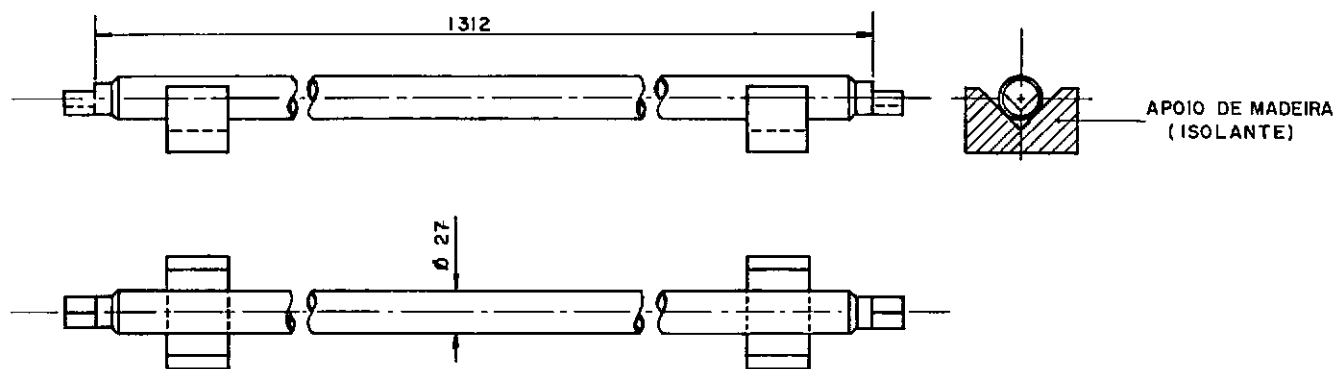


FIGURA IV.8 (b) - GABARITO

FIG. IV.8. (a) defômetro  
(b) gabarito



As barras de aço da armadura dos modelos nas quais se fizeram as medições longitudinais foram cortadas com o comprimento de 1300 mm e nas extremidades destas soldaram-se as peças de apoio para o defôrmetro, ficando as extremidades das barras expostas após a concretagem.

Para a colocação das faces das extremidades das fôrmas, furaram-se nas posições de leitura estas faces a fim de que as extremidades das barras expostas pudessem se encaixar nestes furos. A figura IV.9. ilustra uma barra de aço com as peças de apoio.

Para as medições das deformações longitudinais do concreto, foi necessário chumbarem-se nas extremidades dos modelos peças de apoio para o defôrmetro semelhante às soldadas nas barras de aço. Para isto foi preciso soldar estas peças a um pedaço de barra de aço com 6 cm de comprimento, a fim de que estes 6 cm ficassem no interior do concreto e as peças expostas. Também, neste caso, se fez necessário furar previamente as faces extremas das fôrmas nos locais dos pontos de medição.

As peças foram colocadas nas devidas posições e amarradas a estribos adicionais, e durante a concretagem controlou-se o posicionamento destas manualmente, pois no processo de vibração do concreto elas tendiam a sofrer um pequeno deslocamento. A figura IV.10. apresenta a descrição destes apoios chumbados no concreto e a figura IV.11. mostra a disposição dos pontos de medição das deformações longitudinais totais para os sete modelos.

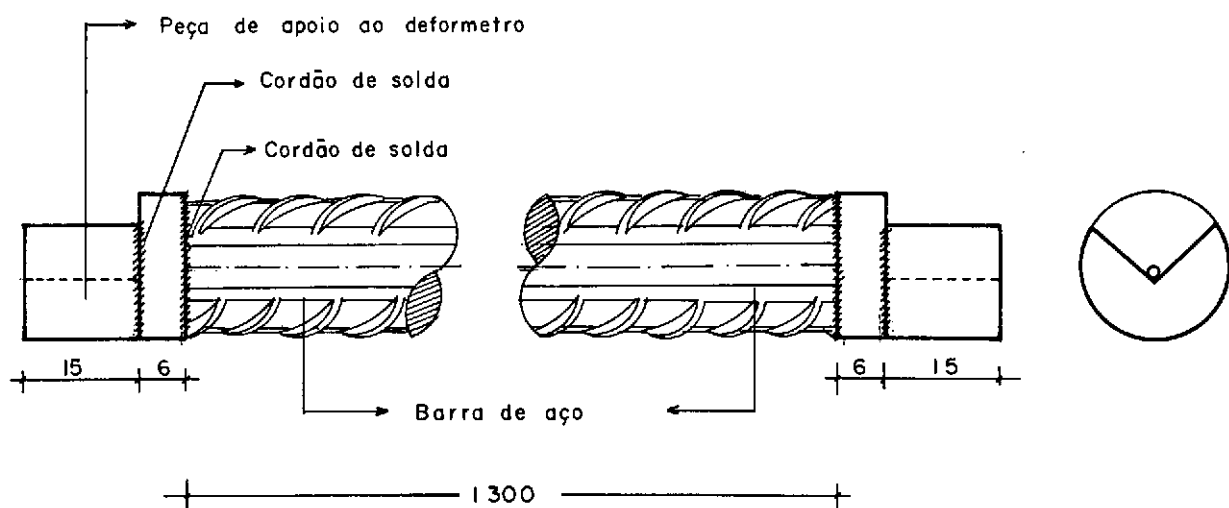


FIGURA IV.9 - Barra de aço com as peças de apoio do deformetro soldada nas extremidades. (Cotas em mm)

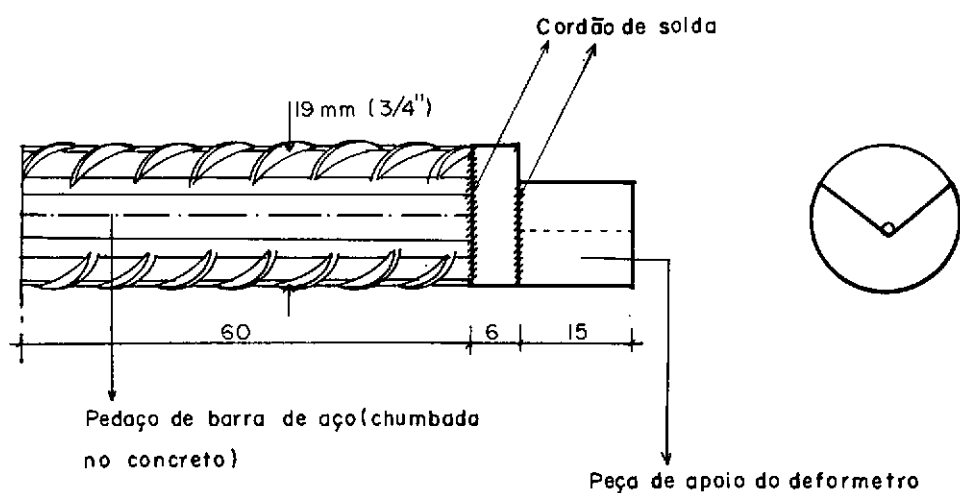


FIGURA IV.10 - Sistema de apoio para leituras no concreto: pedaco de barra de aço soldada à peça de apoio do deformetro. (Cotas em mm)

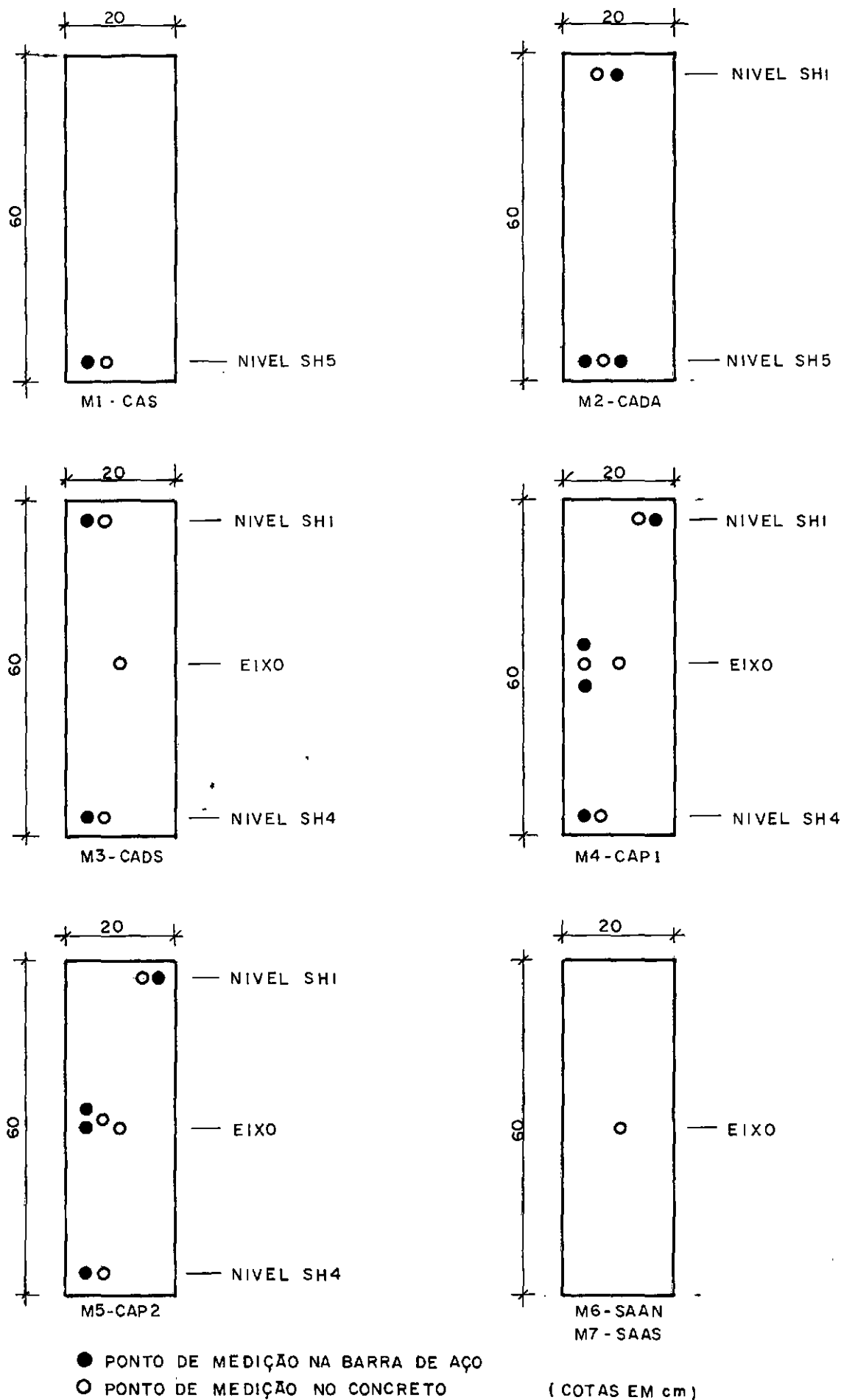


FIG. IV.11 - PONTOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL TOTAL.

## CAPÍTULO V

## V - RESULTADOS

Apresentar-se-ã uma sãrie de tabelas e grãficos que tãem a finalidade de fornecer subsãdios para comparaãõ e a nãlise do comportamento dos modelos sob o efeito da retraãõ.

### 5.1. Resultados Teõricos

Para fins de comparaãõ com os resultados expe\_rimentais, foram calculadas as deformaões especãficas de retraãõ do concreto para o modelo M6 e as deformaões especãficas do aão e do concreto dos demais modelos, resultantes da retraãõ do concreto e influenciadas pela fluãncia do mesmo.

Para a obtenãõ dos resultados teõricos, foram utilizadas as expressões contidas nas bibliografias [1] e [2], baseadas nas Recomendaões Internacionais para o Cãlculo e Exe\_cuçãõ de Estruturas de Concreto - CEB-FIP/70/72 [3].

Foram consultadas tãbãem as bibliografias: [4] a [8].

Os dados utilizados nos cãlculos teõricos foram:

- Umidade relativa mãdia:  $H = 75\%$
- Temperatura ambiental mãdia:  $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Consumo de cimento:  $C = 334\text{ kg/m}^3$
- Fator água/cimento:  $x = 0,60$
- Seãõ transversal:  $A_C = 20 \times 60\text{ cm}^2$
- Espessura fictãcia:  $h_m = 16\text{ cm}$
- Mõdulos de Elasticidade:

$$\text{- Concreto} \quad E_{C7} = 27.000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{C28} = 32.500 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{- Aço :} \quad E_S = 210.000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{- Idade inicial do concreto: } t_0 = 9 \text{ dias}$$

$$\text{- Temperatura de cura inicial: } t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

A temperatura no local de ensaio variou entre 21  $^\circ\text{C}$  e 28  $^\circ\text{C}$  ao longo do período de 440 dias tomado para análise, e a umidade relativa variou entre 66% e 83%. Foram adotados os valores médios de 26  $^\circ\text{C}$  e 75% (Fig. V.1.)

A espessura fictícia foi calculada com um perímetro de 150 cm, tendo sido considerado que as faces de apoio dos modelos sobre lençóis de borracha têm apenas 50% em contato com a atmosfera.

Ainda, a título de comparação, foram calculadas as deformações específicas de retração do concreto no modelo M6, segundo a versão CEB-FIP/78 [7].

Os resultados teóricos são apresentados nas Tabelas e nos Gráficos, juntamente com os resultados experimentais.

## 5.2. Resultados Experimentais

### 5.2.1. Tabelas de deformações específicas

Nas tabelas são apresentadas as deformações específicas superficiais longitudinais médias obtidas com o defôrmetro D 250, em três seções verticais, SV2, SV4 e SV5, para seis valores de  $(t-t_0)$ , onde  $t_0 = 9$  dias é a idade do concreto quando se iniciaram as medições (por problemas de transporte e colo

cação da parafina nas faces extremas dos modelos, não foi possível se efetuar as primeiras leituras na idade  $t_0 = 7$  dias, fim de cura dos modelos).

Nas seções SV2 e SV4 a deformação específica, em cada nível horizontal, corresponde à média dos 4 pontos de medição simétricos entre si:  $E_i$ ,  $D_i$ ,  $ES_i$  e  $DS_i$ . Na seção SV5 a deformação específica, em cada nível horizontal, corresponde somente à média dos 2 pontos de medição simétricos:  $E_i$  e  $D_i$ . Vale observar que a seção SV5 é a seção central do modelo (de simetria longitudinal).

Ainda nas tabelas são apresentadas as deformações específicas longitudinais médias, obtidas a partir das medições das deformações longitudinais totais nas barras de aço e no concreto. Evidentemente, os valores em cada idade são os mesmos para todas as seções verticais, em cada nível horizontal, tendo sido tomada a média nos casos de medição num mesmo nível, tanto para as barras de aço como para o concreto.

As tabelas são apresentadas em dois grupos:

Grupo A - os resultados apresentados são brutos, sem correção da influência da variação da temperatura do meio ambiente, ao longo das medições.

Grupo B - os resultados apresentados, são os constantes nas tabelas do Grupo A, corrigidos do efeito da variação da temperatura do meio ambiente.

A apresentação desses dois grupos de resultados, tem por finalidade evidenciar como as variações da temperatura

e da umidade relativa do meio ambiente influem no estudo da retração do concreto. Nas tabelas 6A e 6B constam os valores de  $T(^{\circ}\text{C})$  e  $H(\%)$  medidos para  $(t-t_0)$  apresentados.

Na fig. V.1. apresenta-se o gráfico das variações de temperatura e de umidade do local de ensaio, ao longo do tempo. O registro desses parâmetros foi realizado utilizando-se de dois aparelhos:

- Termo-Higrôgrafo: colocado ao lado dos modelos, o qual registra ininterruptamente a temperatura e a umidade do ambiente.
- Higrômetro de termômetro seco e úmido, com o qual se media pela manhã e tarde a temperatura e umidade do ambiente, nos dias úteis.

A correção dos valores brutos apresentados nas tabelas do Grupo A, foi feita partindo-se das considerações abaixo:

Influência da temperatura nas medições com extensômetros mecânicos.

#### a) Notações

- $m$  - modelo;
- $g$  - gabarito;
- $L_{m_0}$  - leitura de referência no modelo, à temperatura  $T_0$ ;
- $L_m$  - leituras posteriores no modelo, à temperatura  $T$ ;
- $L_{g_0}$  - leitura de referência no gabarito, à temperatura  $T_0$ ;
- $L_g$  - leituras posteriores no gabarito, à temperatura  $T$ ;
- $\Delta L_m$  - deformação aparente do modelo;



- $\Delta L_{ms}$  - deformação do modelo, devido a retração;  
 $\Delta L_{mt}$  - deformação do modelo, devido a variação de temperatura;  
 $\Delta L_{me}$  - deformação inerente ao extensômetro, devido a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e as causas mecânicas, como montagem e desmontagem de peças;  
 $\Delta L_g$  - deformação aparente no gabarito;  
 $\Delta L_{gt}$  - deformação no gabarito, devido a variação de temperatura;  
 $\Delta L_{ge}$  - deformação inerente ao extensômetro e igual a  $\Delta L_{me}$ ;  
 $\alpha_m$  - coeficiente de dilatação térmica do modelo;  
 $\alpha_g$  - coeficiente de dilatação térmica do gabarito;  
 $l_0$  - base de medição;  
 $T_m$  - temperatura no modelo;  
 $T_g$  - temperatura no gabarito.

## b) Equações de deformações

### b.1. deformação aparente no modelo

$$\Delta L_m = \Delta L_{ms} + \Delta L_{mt} + \Delta L_{me} = L_m - L_{mo}$$

$$\text{onde: } \Delta L_{mt} = l_0 \cdot \alpha_m \cdot \Delta T$$

### b.2. deformação aparente no gabarito

$$\Delta L_g = \Delta L_{gt} + \Delta L_{ge} = L_g - L_{go}$$

$$\text{onde: } \Delta L_{gt} = l_0 \cdot \alpha_g \cdot \Delta T$$

### b.3. deformação do modelo devido a retração

tendo em vista que  $\Delta L_{me} = \Delta L_{ge}$ , resulta

$$\Delta L_{ms} = \Delta L_m - \Delta L_g - l_0 (\alpha_m - \alpha_g) \Delta T \quad (V.1.)$$

As leituras realizadas no gabarito possibilitam a eliminação da influência da temperatura e de causas mecânicas no zero do extensômetro. Se o gabarito tiver o mesmo coeficiente de dilatação térmica do modelo, elimina-se automaticamente a influência da temperatura no modelo, supondo-se que  $T_m = T_g$ . Caso  $\alpha_m$  seja diferente de  $\alpha_g$ , esta influência deve ser corrigida medindo-se  $\Delta T$  e aplicando-se a correção  $l_0(\alpha_m - \alpha_g)\Delta T$ .

c) Aplicação da equação (V.1.) no caso da presente pesquisa:

c.1. para os extensômetros mecânicos: D250 e tensotast:

$$\alpha_g = 0 \text{ (material é invar)}$$

$$\Delta L_g = 0 \text{ (não houve problemas mecânicos)}$$

$$\text{logo: } \Delta L_{ms} = \Delta L_m - l_0 \cdot \alpha_m \cdot \Delta T \quad (V.2.)$$

c.2. para o defômetro COPPE:

$$\text{Supondo: } \alpha_m = \alpha_g$$

modelo: concreto armado

gabarito: aço

$$\Delta L_{ms} = \Delta L_m - \Delta L_g \quad (V.3.)$$

As deformações longitudinais totais medidas com o defômetro COPPE deveriam ser corrigidas de  $\Delta L_g$  (equação V.3). Ao longo das medições constatou-se um  $\Delta L_g$  crescente (em valor absoluto), mas concluiu-se que isto se devia a um amassamento progressivo no gabarito, na peça de apoio do defômetro, e não às variações de temperatura ou de causas mecânicas no defômetro. Optou-se assim por considerar  $\Delta L_g = 0$  e não efetuar nenhuma correção nas deformações específicas longitudinais totais médias obtidas a partir das deformações longitudinais totais.

Obs. Os encurtamentos serão considerados negativos e os alonga  
mentos positivos.

T A B E L A - 1A

RESULTADOS DO MODELO MI - CAS

 $\epsilon_{csm}$  - Deformações específicas superficiais médias $\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias $\epsilon_{teor.}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-t <sub>0</sub> (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,6	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	$t-t_0$ (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{csm}$	NÍVEL		160	247	253	271	372	432	124	194	214	241	334	438	106	190	202	232	318	414
	SH1		139	206	186	228	309	402	119	176	186	212	291	387	110	182	198	228	298	380
	SH2		124	183	192	202	277	346	88	141	149	164	237	304	74	126	134	152	210	278
	SH3		113	173	180	186	253	310	57	119	110	129	169	230	68	108	110	116	174	224
	SH4		70	94	106	93	145	155	29	59	56	55	103	135	46	66	82	68	118	150
$\epsilon_m$	SH5	AÇO	67	95	118	127	158	182	67	95	118	127	158	182	67	95	118	127	158	182
		CONC.	70	95	115	123	153	176	70	95	115	123	153	176	70	95	115	123	153	176
$\epsilon_{teor.}$	SH1		83	124	148	163	187	244	83	124	148	163	187	244	83	124	148	163	187	244
	SH5		53	74	86	93	104	127	53	74	86	93	104	127	53	74	86	93	104	127

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,6	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon_{\text{CSM}}$  - Deformações específicas superficiais médias

$\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias

$\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB/FIP/70/72

$\epsilon$  ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-to (dias)	NÍVEL	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{CSM}}$	SH1		75	135	132	143	224	279	71	114	129	137	201	266	114	130	140	146	212	282
	SH2		124	177	169	198	283	361	100	145	150	165	223	325	82	120	128	138	202	280
	SH3		129	187	182	204	289	376	61	109	115	137	202	281	58	88	94	108	156	228
	SH4		96	152	153	169	243	306	55	85	98	110	158	226	42	80	90	98	146	206
	SH5		46	83	93	90	132	165	21	45	56	53	98	140	44	80	92	90	134	194
$\epsilon_m$	SH1	AÇO	126	168	193	207	252	270	126	168	193	207	252	270	126	168	193	207	252	270
		CONC.	118	165	186	201	252	297	118	165	186	201	252	297	118	165	186	201	252	297
	SH5	AÇO	69	89	116	122	149	175	69	89	116	122	149	175	69	89	116	122	149	175
		CONC.	68	89	118	127	155	186	68	89	118	127	155	186	68	89	118	127	155	186
$\epsilon_{\text{teor.}}$	SH1		65	94	110	120	135	169	65	94	110	120	135	169	65	94	110	120	135	169
	SH5		52	74	85	92	103	126	52	74	85	92	103	126	52	74	85	92	103	126

## T A B E L A - 3A

RESULTADOS DO MODELO - M3 - CADS

 $\epsilon_{CSM}$  - Deformações específicas superficiais médias $\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias $\epsilon_{teor.}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,6	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon$ ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t - to (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{CSM}$	NÍVEL		69	105	107	107	160	202	53	88	77	97	129	204	64	100	92	108	148	244
	SH1		97	138	139	160	228	320	68	107	106	124	173	251	60	84	84	100	140	226
	SH2		96	144	147	157	225	310	50	80	82	96	155	230	44	64	60	70	120	170
	SH3		63	91	94	81	138	184	40	68	76	72	122	180	34	52	54	51	87	120
$\epsilon_m$	SH1	AÇO	65	98	123	133	160	180	65	98	123	133	160	180	65	98	123	133	160	180
		CONC.	69	100	122	136	170	186	69	100	122	136	170	186	69	100	122	136	170	186
	EIXO		61	99	136	150	195	266	61	99	136	150	195	266	61	99	136	150	195	266
	SH4	AÇO	34	60	92	97	125	168	34	60	92	97	125	168	34	60	92	97	125	168
		CONC.	39	59	90	97	124	164	39	59	90	97	124	164	39	59	90	97	124	164
	QUALQUER		54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131
$\epsilon_{teor.}$																				

## RESULTADOS DO MODELO M4 - CAP1

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

$\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias

$\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias

$\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

$\epsilon$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-to (dias)																			
	NÍVEL		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{csm}}$	SH1		74	99	92	93	145	177	43	64	62	62	177	163	30	46	46	42	88	128
	SH2		67	98	80	90	149	205	39	49	48	52	95	187	48	72	62	72	114	180
	SH3		60	106	101	106	161	189	38	62	55	67	115	181	44	60	68	60	112	172
	SH4		43	77	67	95	153	210	62	58	52	58	102	180	20	44	34	30	90	148
$\epsilon_{\text{m}}$	SH1	AÇO	95	121	142	144	169	175	95	121	142	144	169	175	95	121	142	144	169	175
		CONC.	91	114	138	144	170	182	91	114	138	144	170	182	91	114	138	144	170	182
	EIXO	AÇO	75	94	113	129	151	182	75	94	113	129	151	182	75	94	113	129	151	182
		CONC.	73	94	122	132	156	188	73	94	122	132	156	188	73	94	122	132	156	188
	SH4	AÇO	63	76	97	117	132	165	63	76	97	117	132	165	63	76	97	117	132	165
		CONC.	61	75	95	115	128	170	61	76	95	115	128	170	61	75	95	115	128	170
$\epsilon_{\text{teor.}}$	QUALQUER		47	66	75	81	90	109	47	66	75	81	90	109	47	66	75	81	90	109

T A B E L A - 5A

RESULTADOS DO MODELO M5 - CAP2

- $\epsilon_{CSM}$  - Deformações específicas superficiais médias  
 $\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias  
 $\epsilon_{teor.}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

.52.

$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-to (dias)																			
	NÍVEL		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{CSM}$	SH1		51	93	87	88	126	160	36	57	49	52	95	128	34	64	47	40	90	124
	SH2		47	83	71	76	135	190	27	44	41	36	71	159	4	30	37	30	70	94
	SH3		65	102	93	92	152	196	8	36	41	31	64	146	26	50	43	50	96	164
	SH4		55	97	78	77	132	175	13	46	40	40	81	140	22	64	49	52	100	152
$\epsilon_m$	SH1	AÇO	71	96	109	114	137	133	71	96	109	114	137	133	71	96	109	114	137	133
		CONC.	85	114	127	133	163	168	85	114	127	133	163	168	85	114	127	133	163	168
	EIXO	AÇO	56	77	100	107	130	156	56	77	100	107	130	156	56	77	100	107	130	156
		CONC.	64	82	104	119	143	167	64	82	104	119	143	167	64	82	104	119	143	167
	SH4	AÇO	59	79	113	114	139	163	59	79	113	114	139	163	59	79	113	114	139	163
		CONC.	47	69	92	103	123	148	47	69	92	103	123	148	47	69	92	103	123	148
$\epsilon_{teor.}$	QUALQUER		42	58	66	71	78	93	42	58	66	71	78	93	42	58	66	71	78	93



## RESULTADOS DO MODELO M6 - SAAN

t-t <sub>0</sub> (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

$\epsilon_{\text{CSM}}$  - Deformações específicas superficiais médias

$\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias

$\epsilon_{\text{teor}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

$\epsilon_{\text{teor}}^*$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB/78

$\epsilon$  ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO	SV2						SV4						SV5					
	t - t <sub>0</sub> (dias) NÍVEL	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{CSM}}$	SH1	132	216	213	239	347	410	100	184	187	205	275	428	102	170	178	200	286	408
	SH2	107	191	197	213	324	447	86	150	155	180	266	395	86	172	168	188	280	408
	SH3	88	169	171	186	283	390	78	141	151	172	249	372	60	142	142	164	248	382
	SH4	92	164	170	186	283	390	68	135	136	161	224	341	64	110	108	122	218	328
$\epsilon_m$	EIXO	105	151	206	226	290	380	105	151	206	226	290	380	105	151	206	226	290	380
$\epsilon_{\text{teor}}$	QUALQUER	74	112	132	146	166	215	74	112	132	146	166	215	74	112	132	146	166	215
$\epsilon_{\text{teor}}^*$	QUALQUER	31	52	64	71	90	135	31	52	64	71	90	135	31	52	64	71	90	135

## RESULTADOS DO MODELO MI - CAS

t-t <sub>0</sub> (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,6	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas

$\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias

$\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

$\epsilon$ ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO t-t <sub>0</sub> (dias)		SV2						SV4						SV5					
	NÍVEL		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{csm}}$	SH1		178	263	280	314	399	427	142	210	241	284	361	433	124	206	229	275	345	409
	SH2		157	222	248	271	336	437	137	192	213	255	318	382	128	198	225	271	325	375
	SH3		142	199	219	245	304	341	106	157	176	207	264	329	92	142	161	195	237	273
	SH4		131	189	207	229	280	305	75	135	137	172	196	225	86	124	149	159	201	219
	SH5		88	110	133	136	172	155	47	75	83	98	130	130	64	82	109	111	145	145
$\epsilon_{\text{m}}$	SH5	AÇO	67	95	118	127	158	182	67	95	118	127	158	182	67	95	118	127	158	182
		CONC.	70	95	115	123	153	176	70	95	115	123	153	176	70	95	115	123	153	176
$\epsilon_{\text{teor.}}$	SH1		83	124	148	163	187	244	83	124	148	163	187	244	83	124	148	163	187	244
	SH5		53	74	86	93	104	127	53	74	86	93	104	127	53	74	86	93	104	127

## RESULTADOS DO MODELO M2 - CADA

 $\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas $\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias $\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,6	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-to (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{csm}}$	NIVEL																			
	SH1		93	151	159	182	251	274	89	130	156	176	228	261	132	146	167	185	239	277
	SH2		142	193	196	237	310	355	118	161	177	204	250	320	100	136	155	177	229	275
	SH3		147	203	209	243	316	371	79	125	142	176	229	276	76	104	121	147	183	223
	SH4		114	168	180	208	270	301	73	101	125	149	185	221	60	96	117	137	173	201
	SH5		64	99	120	129	159	160	39	61	83	92	125	135	62	96	119	129	161	189
$\epsilon_{\text{m}}$	SH1	AÇO	126	168	193	207	252	270	126	168	193	207	252	270	126	168	193	207	252	270
		CONC.	118	165	186	201	252	297	118	165	186	201	252	297	118	165	186	201	252	297
	SH5	AÇO	69	89	116	122	149	175	69	89	116	122	149	175	69	89	116	122	149	175
		CONC.	68	89	118	127	155	186	68	89	118	127	155	186	68	89	118	127	155	186
$\epsilon_{\text{teor.}}$	SH1		65	94	110	120	135	169	65	94	110	120	135	169	65	94	110	120	135	169
	SH5		52	74	85	92	103	126	52	74	85	92	103	126	52	74	85	92	103	126

## RESULTADOS DO MODELO M3 - CADS

 $\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas $\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias $\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	25,8	77
60	25,8	66
90	26,7	78
120	26,7	80
180	26,7	60
390	23,5	73

$\epsilon$ ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-to (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
NÍVEL																				
$\epsilon_{\text{csm}}$	SH1		87	121	134	146	187	197	71	104	104	136	156	199	82	116	119	147	175	239
	SH2		115	154	166	199	255	315	86	123	133	163	200	246	78	100	111	139	167	221
	SH3		114	160	174	196	252	305	68	96	109	135	182	225	62	80	87	109	147	165
	SH4		81	107	121	120	165	179	58	84	103	111	149	175	52	68	81	90	114	115
$\epsilon_{\text{m}}$	SH1	AÇO	65	98	123	133	160	180	65	98	123	133	160	180	65	98	123	133	160	180
		CONC.	69	100	122	136	170	186	69	100	122	136	170	186	69	100	122	136	170	186
	EIXO		61	99	136	150	195	266	61	99	136	150	195	266	61	99	136	150	195	266
	SH4	AÇO	34	60	92	97	125	168	34	60	92	97	125	168	34	60	92	97	125	168
		CONC.	39	59	90	97	124	164	39	59	90	97	124	164	39	59	90	97	124	164
	QUALQUER		54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131
$\epsilon_{\text{teor.}}$	QUALQUER		54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131	54	77	88	96	107	131

## RESULTADOS DO MODELO M - 4 - CAPI

 $\epsilon_{\text{CSM}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas $\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais totais médias $\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

t-t <sub>0</sub> (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	t-t <sub>0</sub> (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{CSM}}$	SH1		95	115	121	125	172	172	55	80	91	94	144	158	57	62	75	74	115	123
	SH2		88	114	109	122	176	200	60	65	71	84	122	182	69	88	91	104	141	175
	SH3		81	122	130	138	188	184	59	78	84	99	142	176	65	76	97	92	139	167
	SH4		64	93	96	127	180	205	47	78	81	90	129	175	41	60	63	62	117	143
$\epsilon_m$	SH1	AÇO	95	121	142	144	169	175	95	121	142	144	169	175	95	121	142	144	169	175
		CONC.	91	114	138	144	170	182	91	114	138	144	170	182	91	114	138	144	170	182
	EIXO	AÇO	75	94	113	129	151	182	75	94	113	129	151	182	75	94	113	129	151	182
		CONC.	73	94	122	132	156	188	73	94	122	132	156	188	73	94	122	132	156	188
	SH5	AÇO	63	76	97	117	132	165	63	76	97	117	132	165	63	76	97	117	132	165
		CONC.	61	75	95	115	128	170	61	75	95	115	128	170	61	75	95	115	128	170
$\epsilon_{\text{teor.}}$	QUALQUER		47	66	75	81	90	109	47	66	75	81	90	109	47	66	75	81	90	109

## RESULTADOS DO MODELO M5 - CAP2

t-to (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

- $\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas  
 $\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias  
 $\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

$\epsilon$ ( $-1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO		SV2						SV4						SV5					
	$t - t_0$ (dias)		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{csm}}$	NÍVEL																			
	SH1		72	109	116	120	153	155	57	73	78	84	122	123	55	80	76	72	117	119
	SH2		68	99	100	108	162	185	48	60	70	68	98	154	25	46	66	62	97	89
	SH3		86	118	122	124	179	191	29	52	70	63	91	141	47	66	72	82	123	159
$\epsilon_{\text{m}}$	SH4		76	113	107	109	159	170	34	62	69	72	108	135	43	80	78	84	127	147
	SH1	AÇO	71	96	109	114	137	133	71	96	109	114	137	133	71	96	109	114	137	133
		CONC.	85	114	127	133	163	168	85	114	127	133	163	168	85	114	127	133	163	168
	EIXO	AÇO	56	77	100	107	130	156	56	77	100	107	130	156	56	77	100	107	130	156
		CONC.	64	82	104	119	143	167	64	82	104	119	143	167	64	82	104	119	143	167
	SH4	AÇO	59	79	113	114	139	163	59	79	113	114	139	163	59	79	113	114	139	163
		CONC.	47	69	92	103	123	148	47	69	92	103	123	148	47	69	92	103	123	148
$\epsilon_{\text{teor.}}$	QUALQUER		42	58	66	71	78	93	42	58	66	71	78	93	42	58	66	71	78	93

## RESULTADOS DO MODELO M6 - SAAN

t-t <sub>0</sub> (dias)	T(°C)	H(%)
30	26,1	78
60	25,6	70
90	26,9	70
120	27,2	82
180	26,7	61
390	23,5	73

$\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias corrigidas

$\epsilon_{\text{m}}$  - Deformações específicas longitudinais totais médias

$\epsilon_{\text{teor.}}$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB-FIP/70/72

$\epsilon_{\text{teor.}}^*$  - Deformações específicas teóricas baseadas no CEB/78

$\epsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	SEÇÃO	SV2						SV4						SV5					
	NÍVEL	t - t <sub>0</sub> (dias)																	
		30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390	30	60	90	120	180	390
$\epsilon_{\text{csm}}$	SH1	153	232	242	271	374	405	121	200	216	237	302	423	123	186	207	232	313	403
	SH2	128	207	226	245	351	442	107	166	184	212	293	390	107	188	197	220	307	403
	SH3	109	185	200	218	310	385	99	157	180	204	276	367	81	158	171	196	275	377
	SH4	113	180	199	218	310	385	89	151	165	193	251	336	85	126	137	154	245	323
$\epsilon_{\text{m}}$	EIXO	105	151	206	226	290	380	105	151	206	226	290	380	105	151	206	226	290	380
$\epsilon_{\text{teor.}}$	QUALQUER	74	112	132	146	166	215	74	112	132	146	166	215	74	112	132	146	166	215
$\epsilon_{\text{teor.}}^*$	QUALQUER	31	52	64	71	90	135	31	52	64	71	90	135	31	52	64	71	90	135

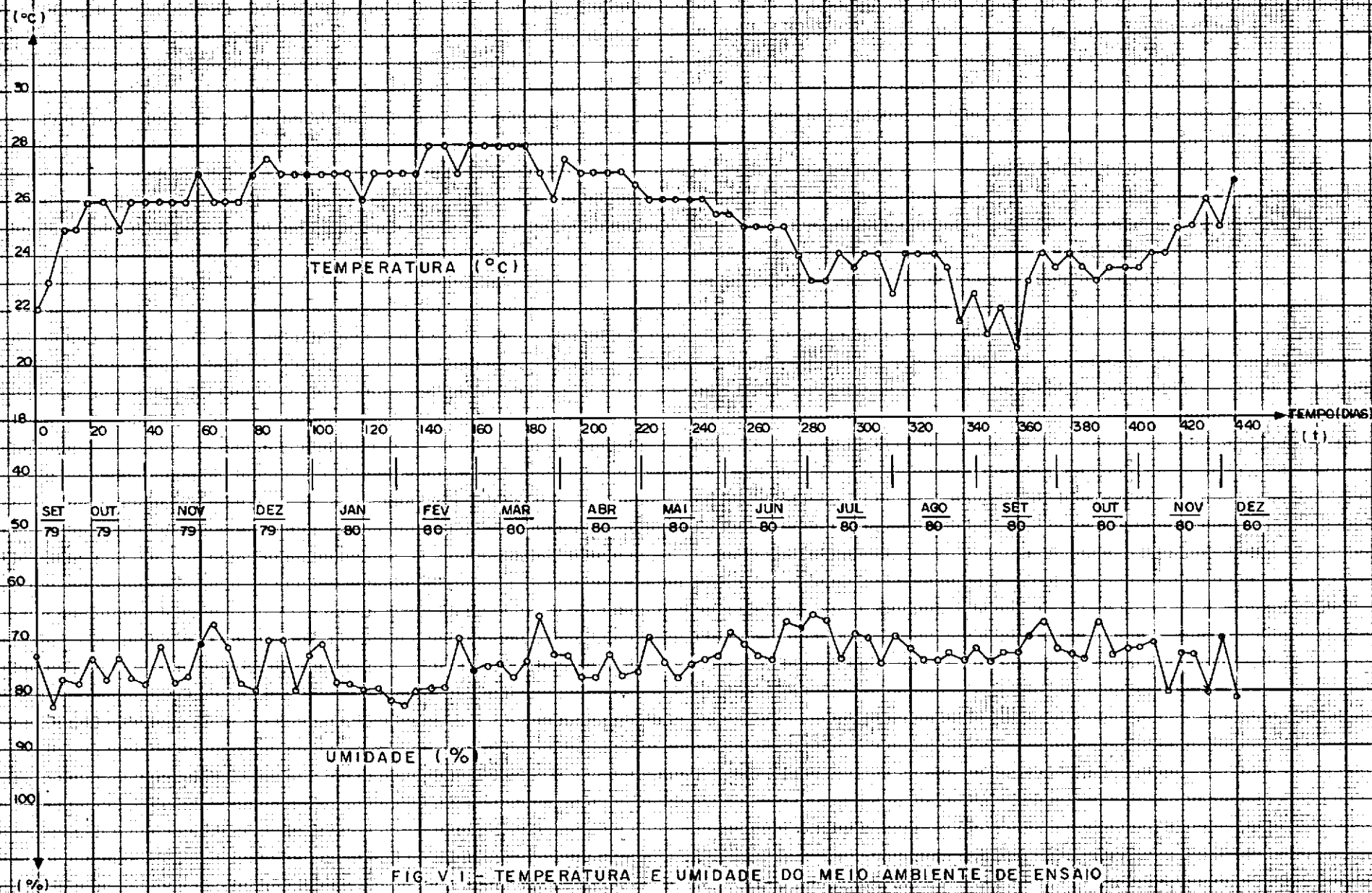


FIG. V.1 - TEMPERATURA E UMIDADE DO MEIO AMBIENTE DE ENSAIO



### 5.2.2. Gráficos

#### 5.2.2.1. Deformações específicas nas seções verticais: SV2, SV4 e SV5

Na figura V.2. são apresentados os gráficos correspondentes aos valores das deformações específicas corrigidas, constantes nas tabelas do grupo B, nas seções verticais SV2, SV4 e SV5 para as idades de  $(t - t_0) = 30, 60, 90, 120, 180$  e 390 dias.

# MODELO M1 CAS

t = 30 DIAS

60 DIAS

90 DIAS

120 DIAS

180 DIAS

390 DIAS

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5

SV2

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5


SV4

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5

SV5

$\epsilon_{esm}$  : 

$\epsilon_m$  : \*

$\epsilon_{teor}$  : 

Escala de  $\epsilon$  : 1cm :  $100 \times 10^{-6}$

FIG. V. 2 -- DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5

# MODELO M2 - CADA

$t - t_0 = 30$  DIAS

60 DIAS

90 DIAS

120 DIAS

180 DIAS

390 DIAS

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5

SV2

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5


SV4

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SH5

SV5

$\epsilon_{cam}$  : 

$\epsilon_m$  : \*

$\epsilon_{teor}$  : 

Escala de  $\epsilon$  : 1cm :  $100 \times 10^{-6}$

FIG. V 2 - DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5

# M O D E L O M 3 - C A D S

t. to = 30 Dias

60 Dias

90 Dias

120 Dias


180 Dias

390 Dias

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV2

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV4

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV5

$\epsilon_{esm}$ : 

$\epsilon_m$ : \*

$\epsilon_{teor}$ : ----

Escala de  $\epsilon$ : 1cm :  $100 \times 10^{-6}$

FIG. V.2 - DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5

# MODELO M4 CAP.1

$t - t_0 = 30$  DIAS

60 DIAS

90 DIAS

120 DIAS

180 DIAS

390 DIAS

SH1  
SH2  
SH3  
SH4

SV2

SH1  
SH2  
SH3  
SH4

SV4

SH1  
SH2  
SH3  
SH4

SV5

$\epsilon_{csm}$  ○ — ○

$\epsilon_m$  \*

$\epsilon_{teor.}$  - - -

Escala de  $\epsilon$  1 cm :  $100 \times 10^{-6}$

FIG.V.2 - DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5

MODELO M-5 - CAP 2

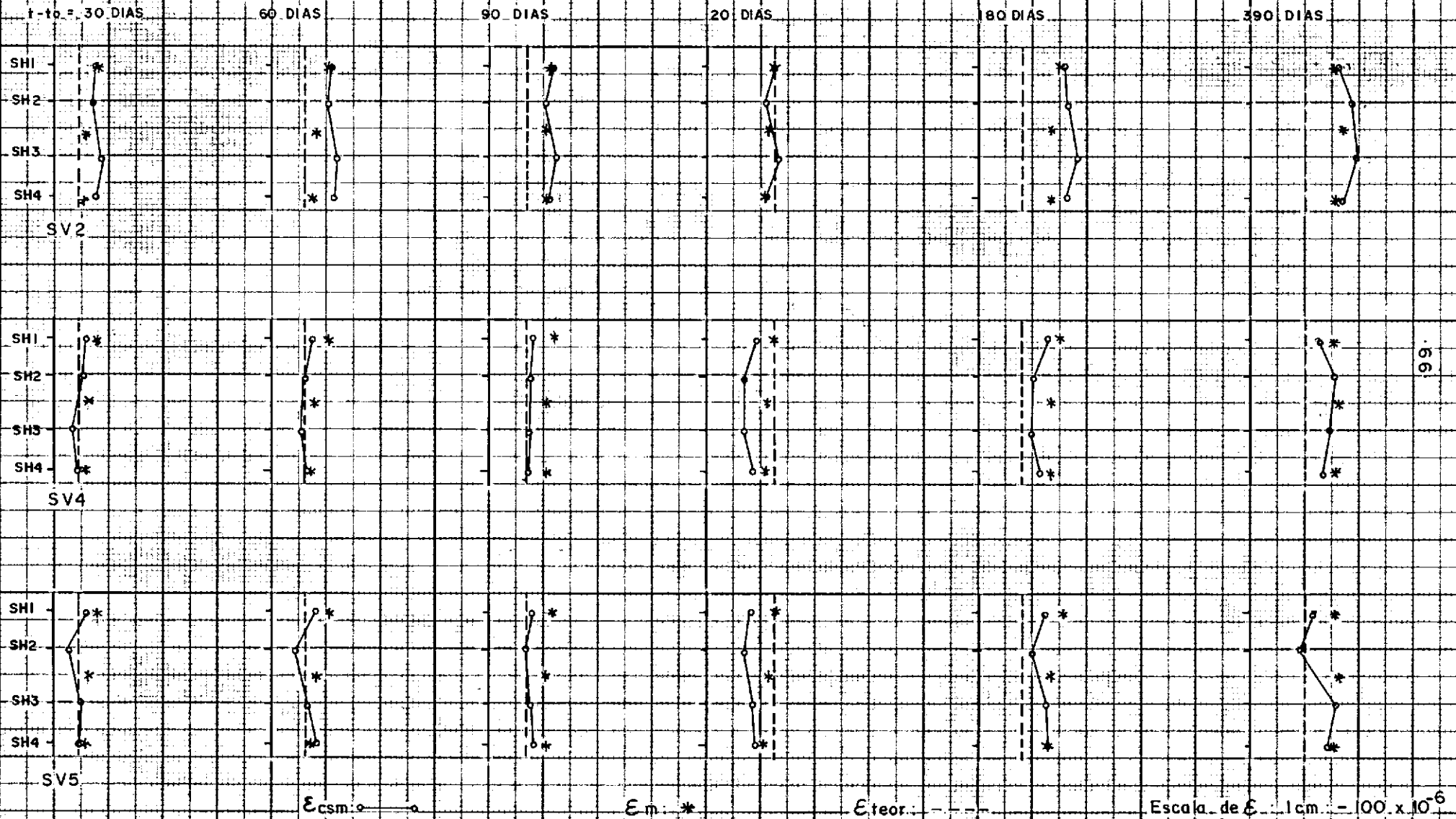


FIG. V-2 -- DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5



# MODELO M6 - SAAN

t - t<sub>0</sub> = 30 DIAS

60 DIAS

90 DIAS

120 DIAS

180 DIAS

390 DIAS

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV2

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV4

SH1  
SH2  
SH3  
SH4  
SV5

$\epsilon_{csm}$

$\epsilon_m$  \*

$\epsilon_{teor}$

Escala de  $\epsilon$  : 1 cm :  $100 \times 10^{-6}$

FIG.V.2 - DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS NAS SEÇÕES VERTICAIS SV2, SV4 E SV5

5.2.2.2. *Evolução da retração na se  
ção vertical SV5 em vários  
níveis, até a idade  $(t-t_0) =$   
440 dias*

Os gráficos da Figura V.3 mostram a evolução da retração teórica e experimental, em alguns níveis, para cada modelo.

Os valores experimentais das deformações específicas aqui apresentados, são valores corrigidos do efeito da variação da temperatura. Vale salientar que para os modelos com armadura temos os valores da "retração aparente" e para o modelo sem armadura - M6, temos valores da "retração livre" influenciada pelo efeito do sistema de apoio (lençol de borracha).



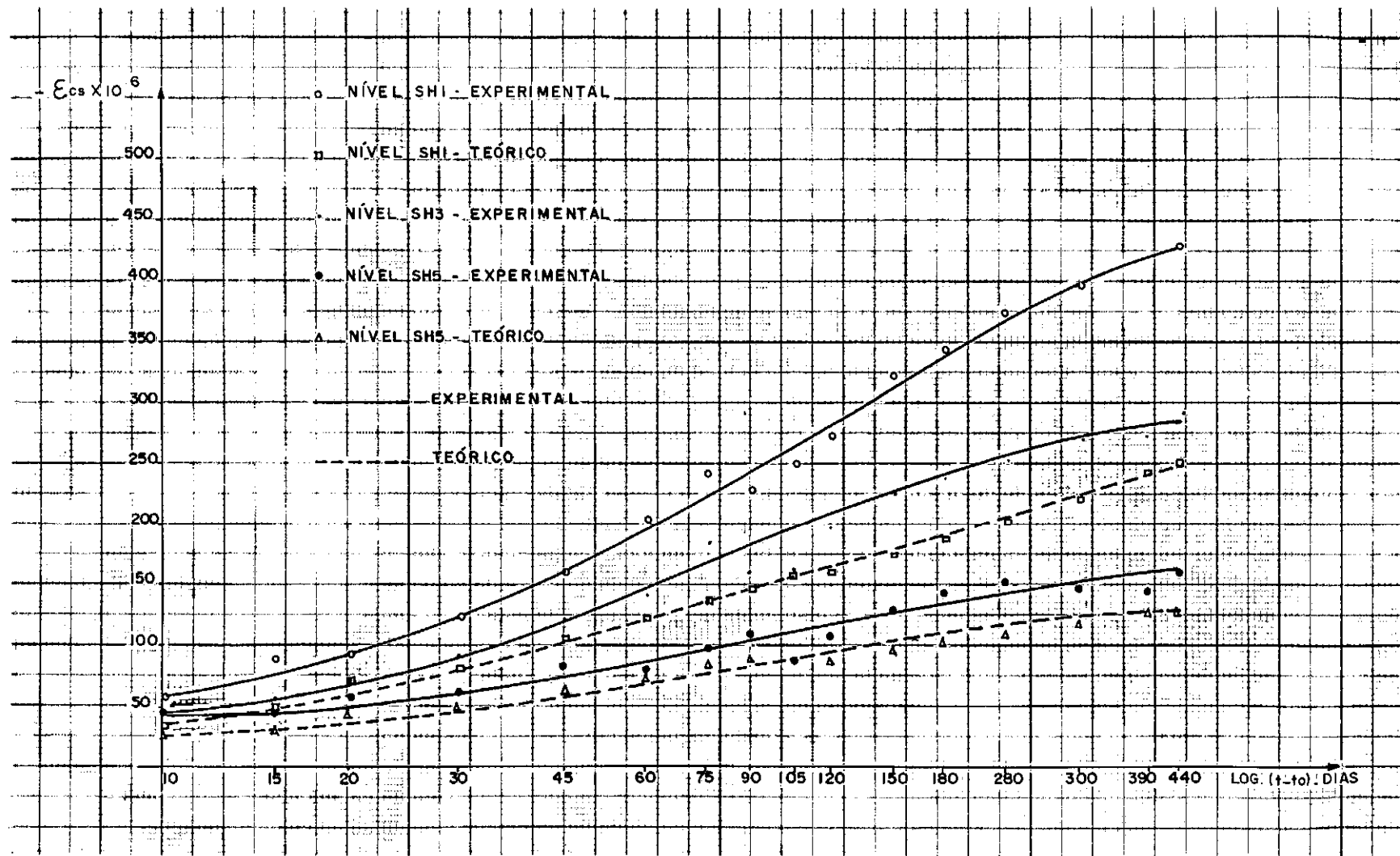


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M1 - CAS

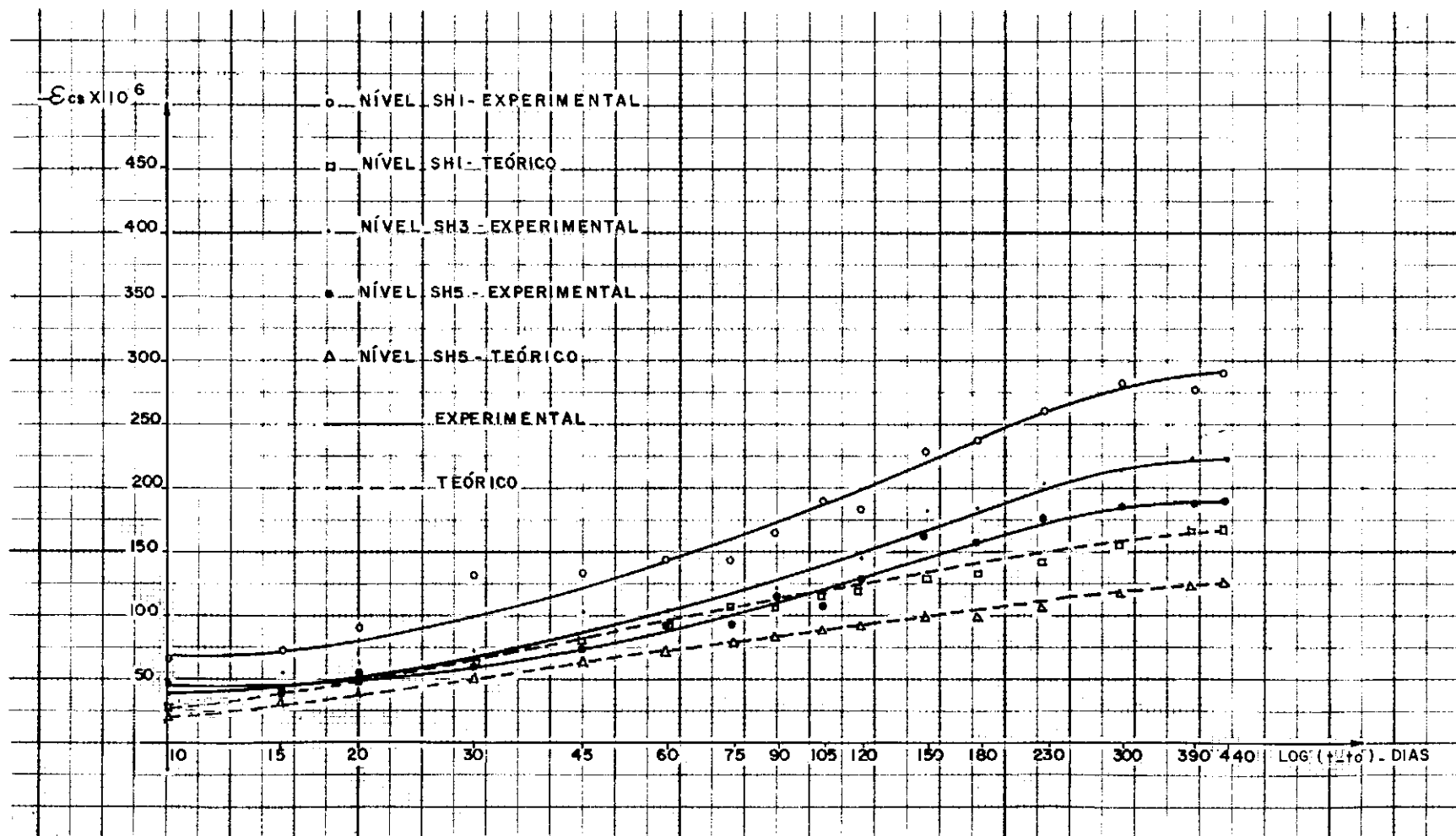


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M2 - CADA

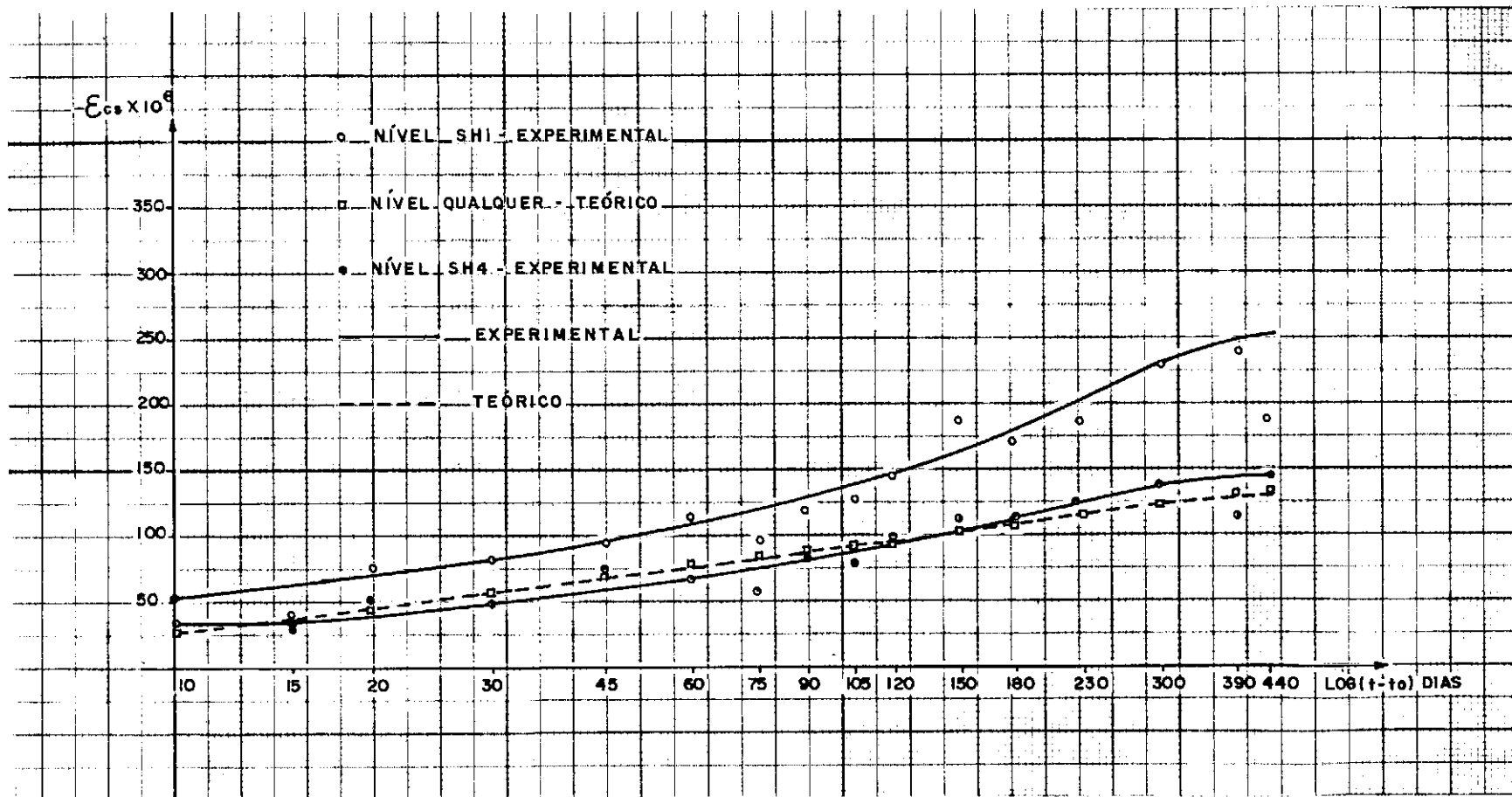


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M3 - CADs

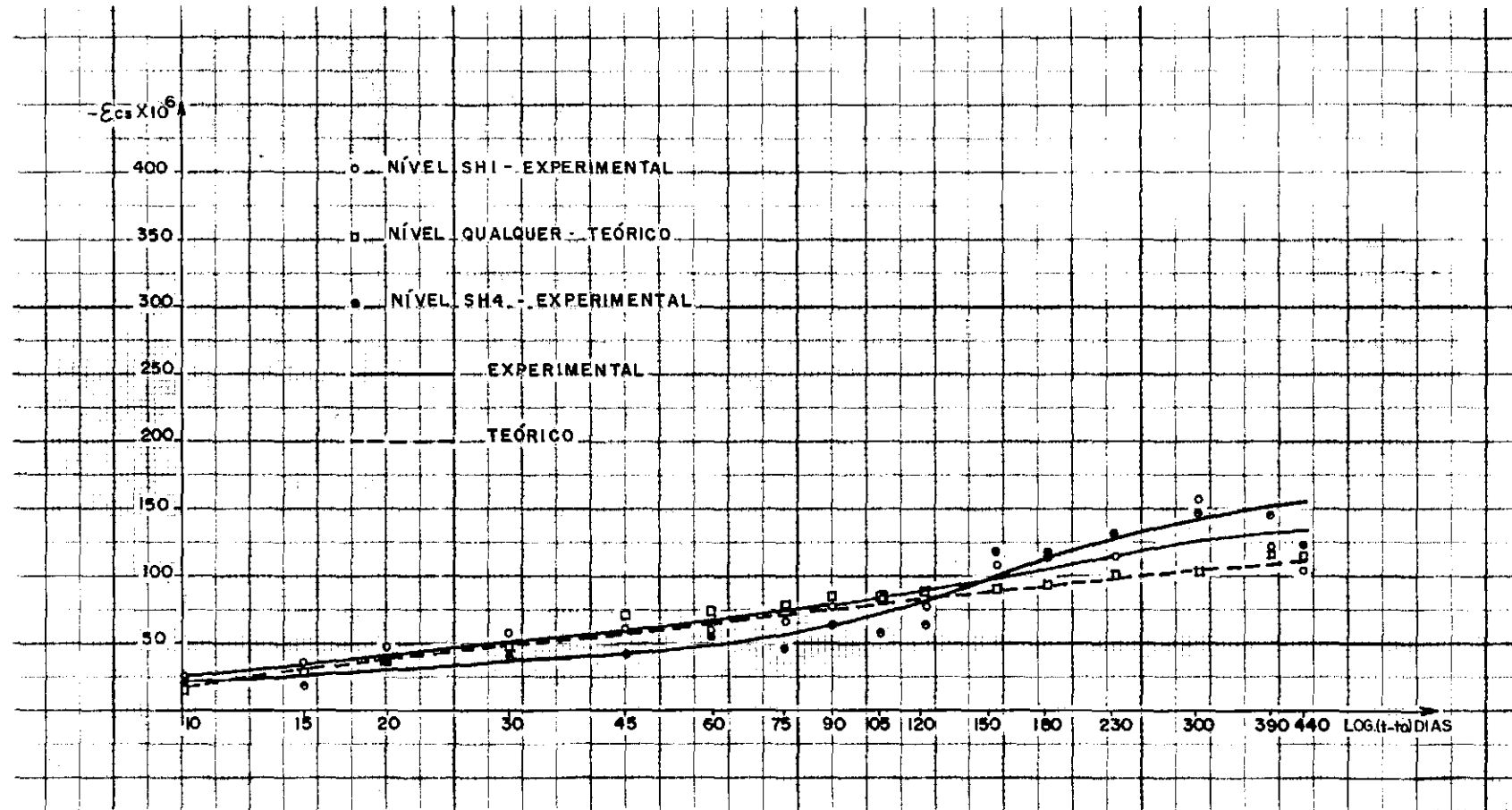


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M4 - CAP1

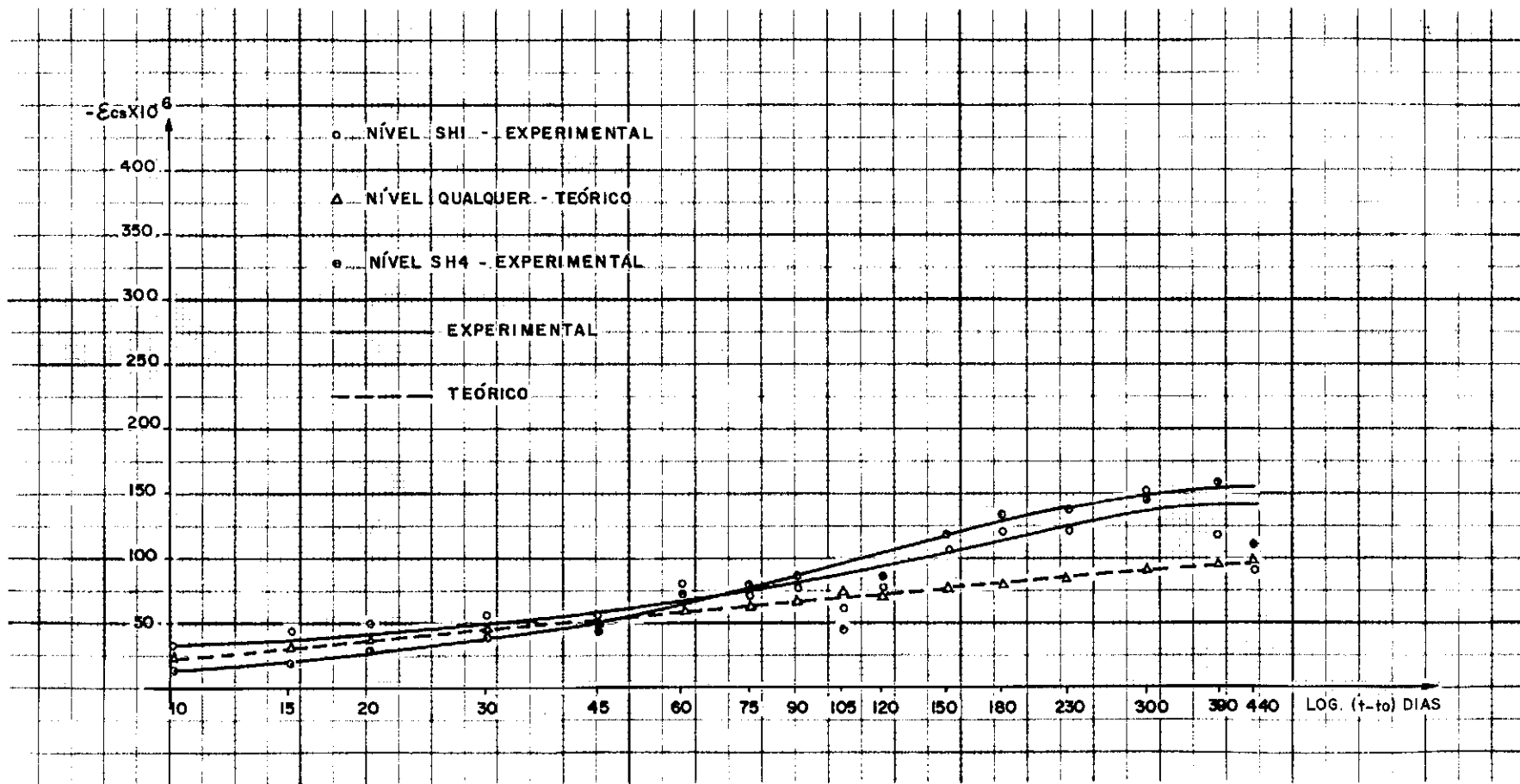


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M5 - CAP2

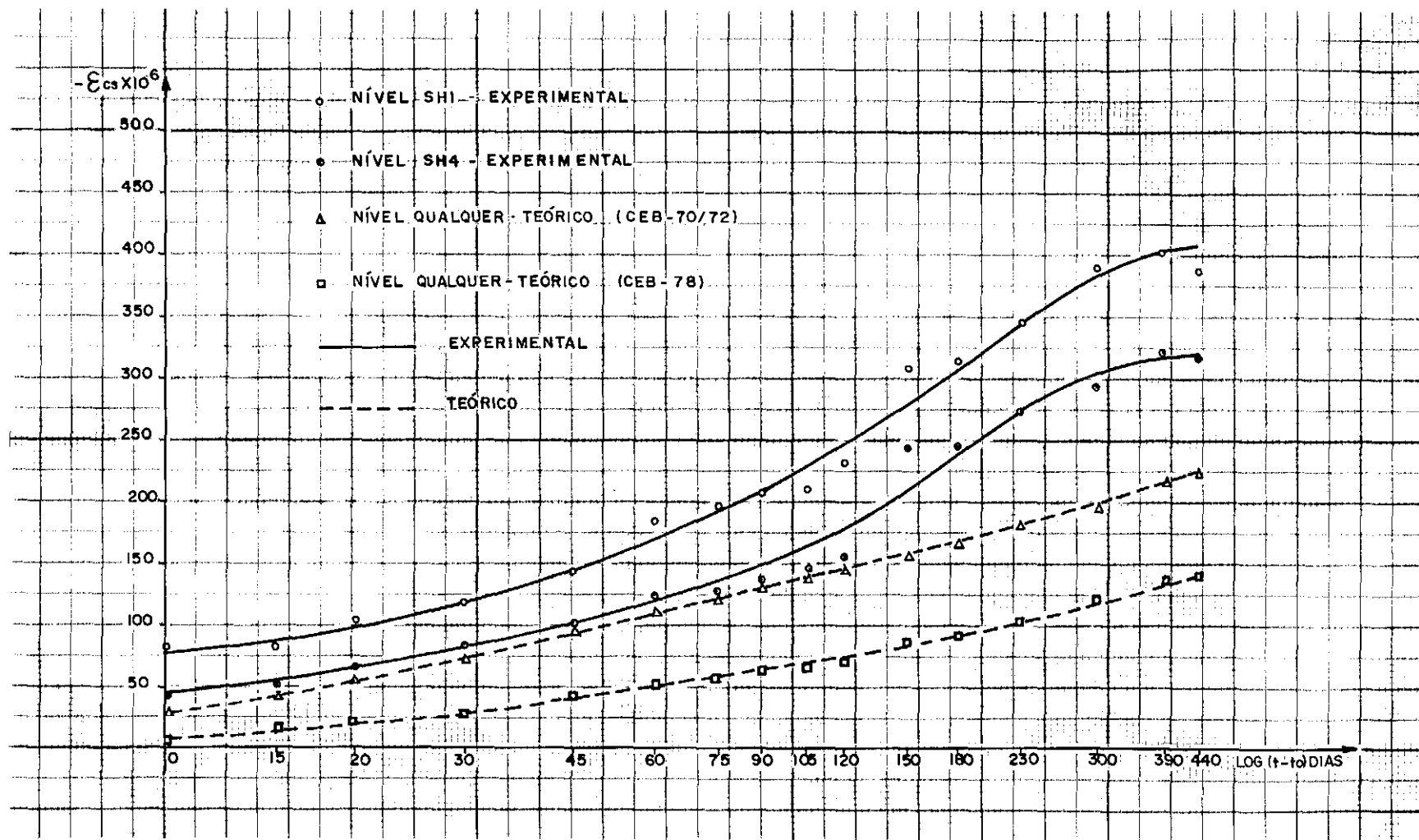


FIG. V.3. - Evolução da retração teórica e experimental na seção SV5

Modelo M6 - SAAN

5.2.2.3. *Evolução das tensões teóricas e experimentais nas armaduras na seção SV5 até a idade  $(t-t_0) = 440$  dias.*

Os gráficos da Figura V.4. mostram a evolução das "tensões de compressão" nas armaduras, em alguns níveis, para cada modelo. Os valores experimentais das tensões foram obtidos a partir dos valores experimentais das deformações específicas superficiais corrigidas (retração aparente), ocorridas nos modelos. Usou-se na obtenção desses valores a expressão da Lei de Hooke:

$$\sigma = \epsilon \cdot E$$

onde:

$$\epsilon = \epsilon_{aço} = \epsilon_{conc.} = \text{retração aparente}$$

$$E = E_{aço} = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \sigma_{aço}$$

Vale ressaltar que a hipótese de aderência perfeita, assumida acima, foi constatada experimentalmente a partir das medições efetuadas com o defômetro COPPE.

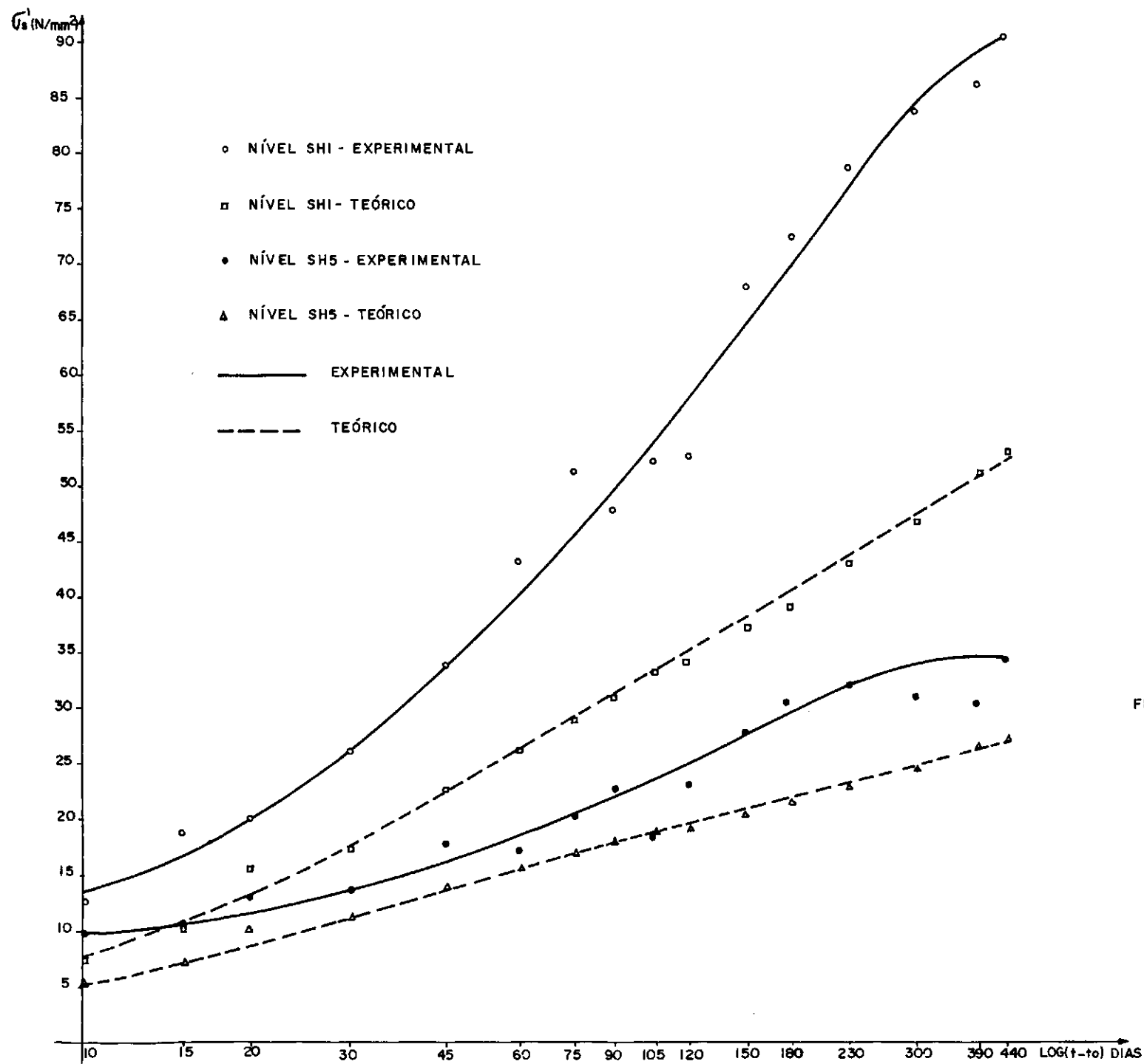


FIG.V.4 - EVOLUÇÃO DAS TENSÕES (TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS) NAS ARMADURAS NA SEÇÃO SV.5.

MODELO MI-CAS



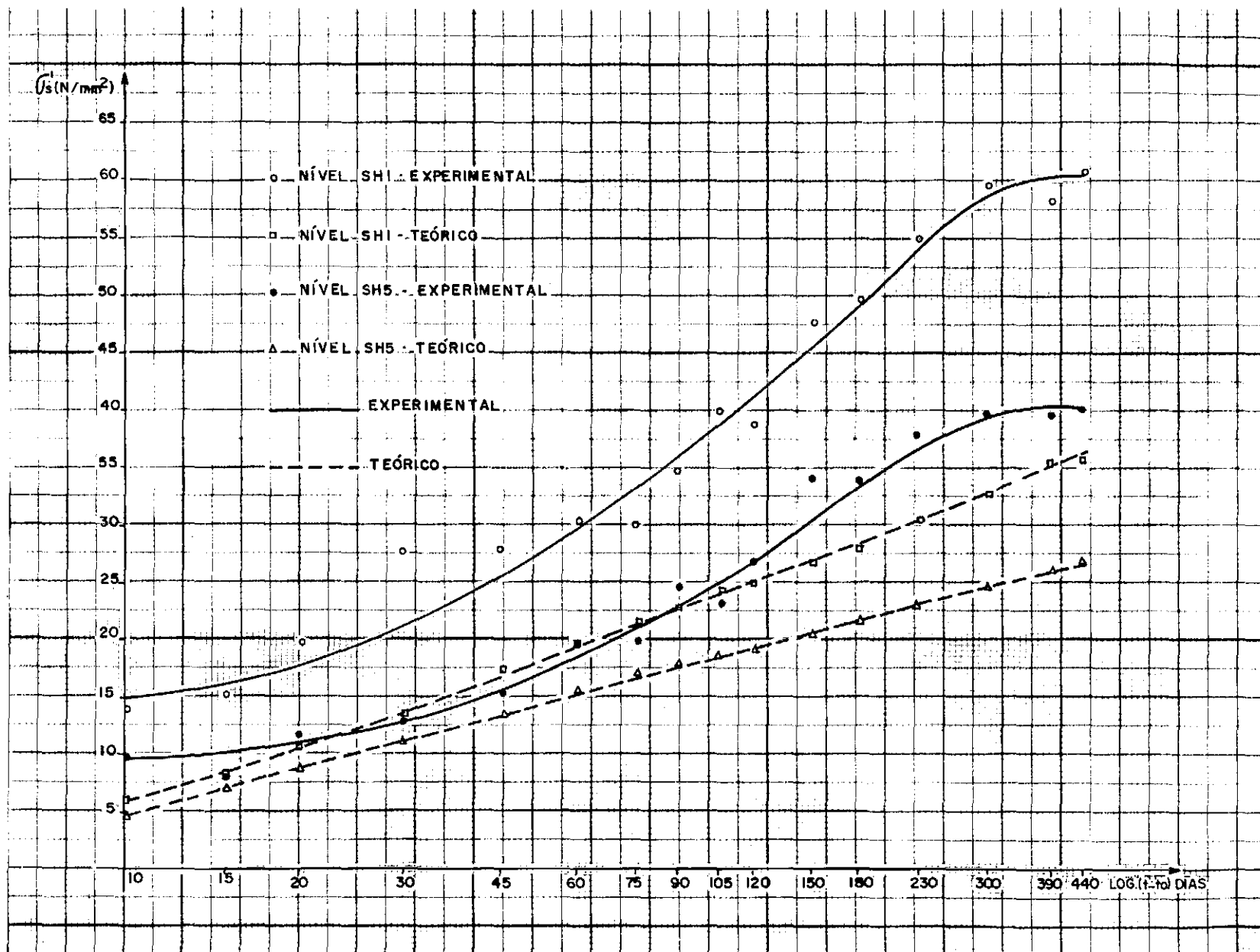


FIG. V.4. - Evolução das tensões (teóricas e experimentais) nas armaduras na seção SV5  
Modelo M2 - CADA

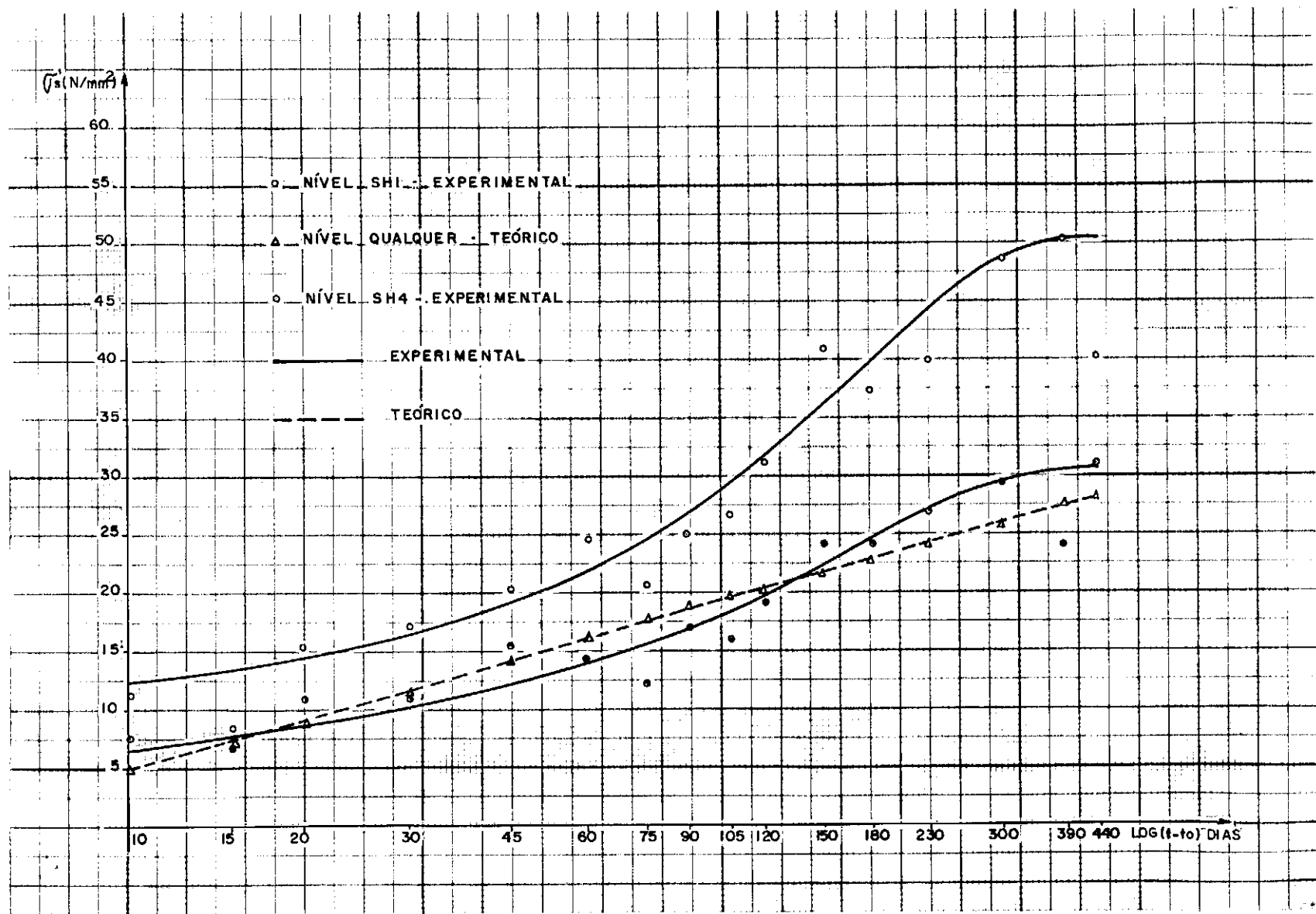


FIG. V.4. - Evolução das tensões (teóricas e experimentais) nas armaduras na seção SV5

Modelo M3 - CADS

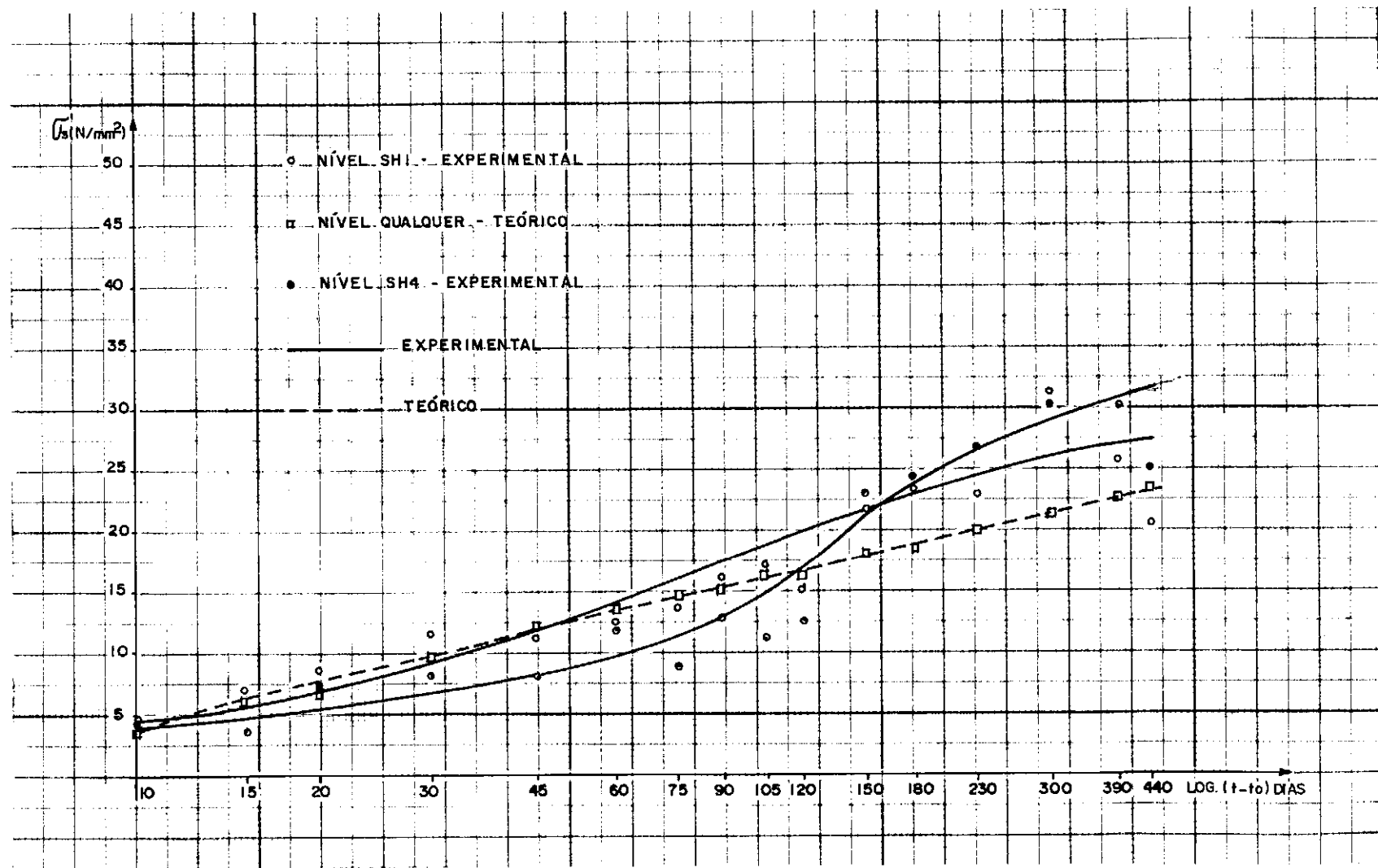


FIG. V.4. - Evolução das tensões (teóricas e experimentais) nas armaduras na seção SV5

Modelo M4 - CAP1

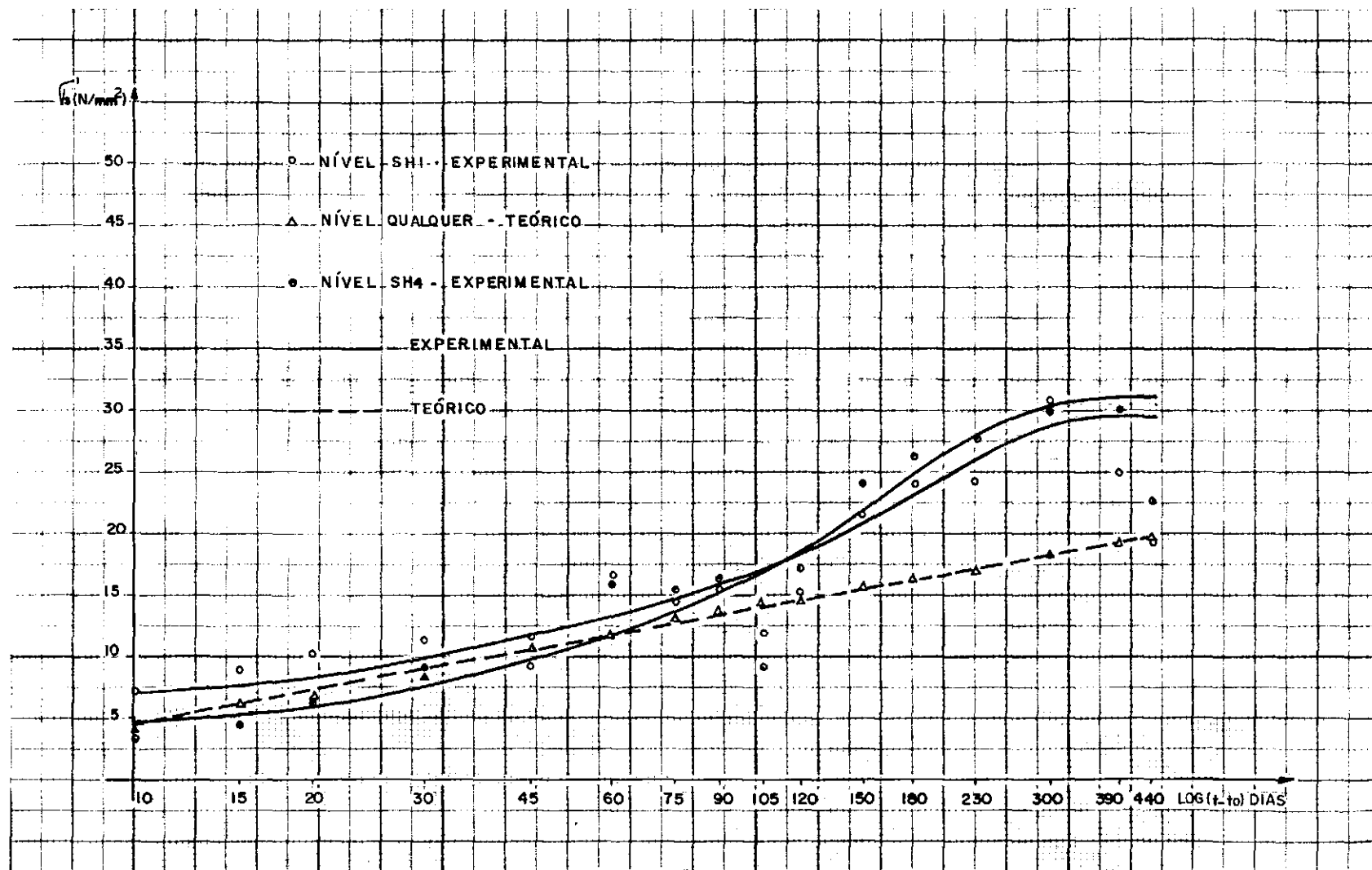


FIG. V.4. - Evolução das tensões (teóricas e experimentais) nas armaduras na seção SV5

Modelo M5 - CAP2

5.2.2.4. *Evolução das Curvaturas teórica e experimental para os modelos M1 e M2, até a idade  $(t-t_0) = 440$  dias*

Os gráficos da figura V.5. mostram a evolução das curvaturas teórica e experimental para os modelos M1 - CAS e M2 - CADA, os quais apresentam armadura dupla assimétrica.

Os valores experimentais das curvaturas foram obtidos a partir da seguinte expressão:

$$\phi_{cs}(t) = \frac{\epsilon_{cs1}(t) - \epsilon_{cs5}(t)}{d}$$

$\epsilon_{cs1}$  - deformação específica ocorrida no nível SH1 (retração aparente)

$\epsilon_{cs5}$  - deformação específica ocorrida no nível SH5 (retração aparente)

$d$  - distância entre os níveis: SH1 e SH5 = 48 cm.

Os valores teóricos para o modelo M1 - CAS foram calculados levando-se em conta a armadura superior desse modelo (porta - estribos).

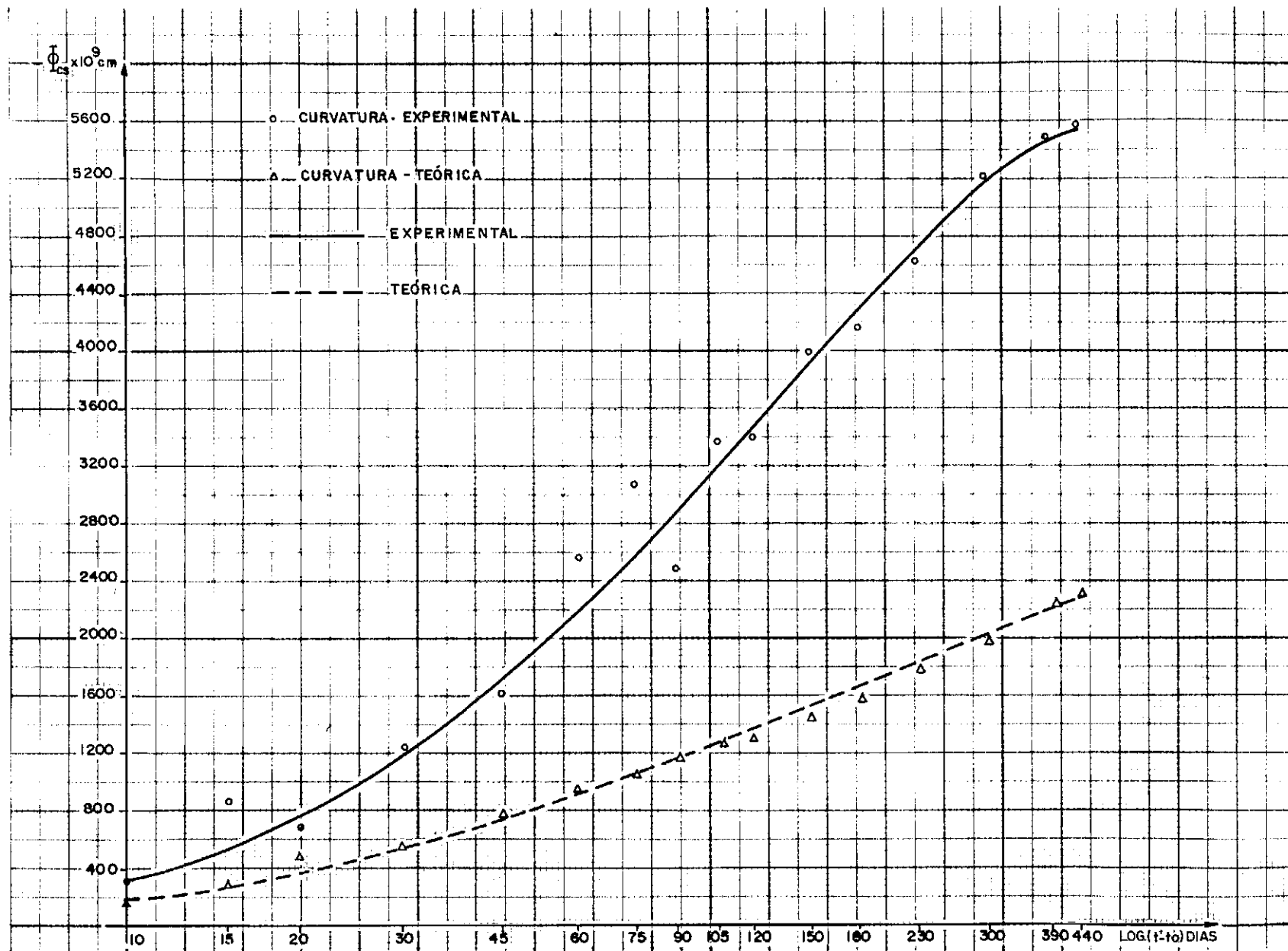


FIG. V.5. - Evolução das curvaturas experimental e teórica

Modelo M1 - CAS

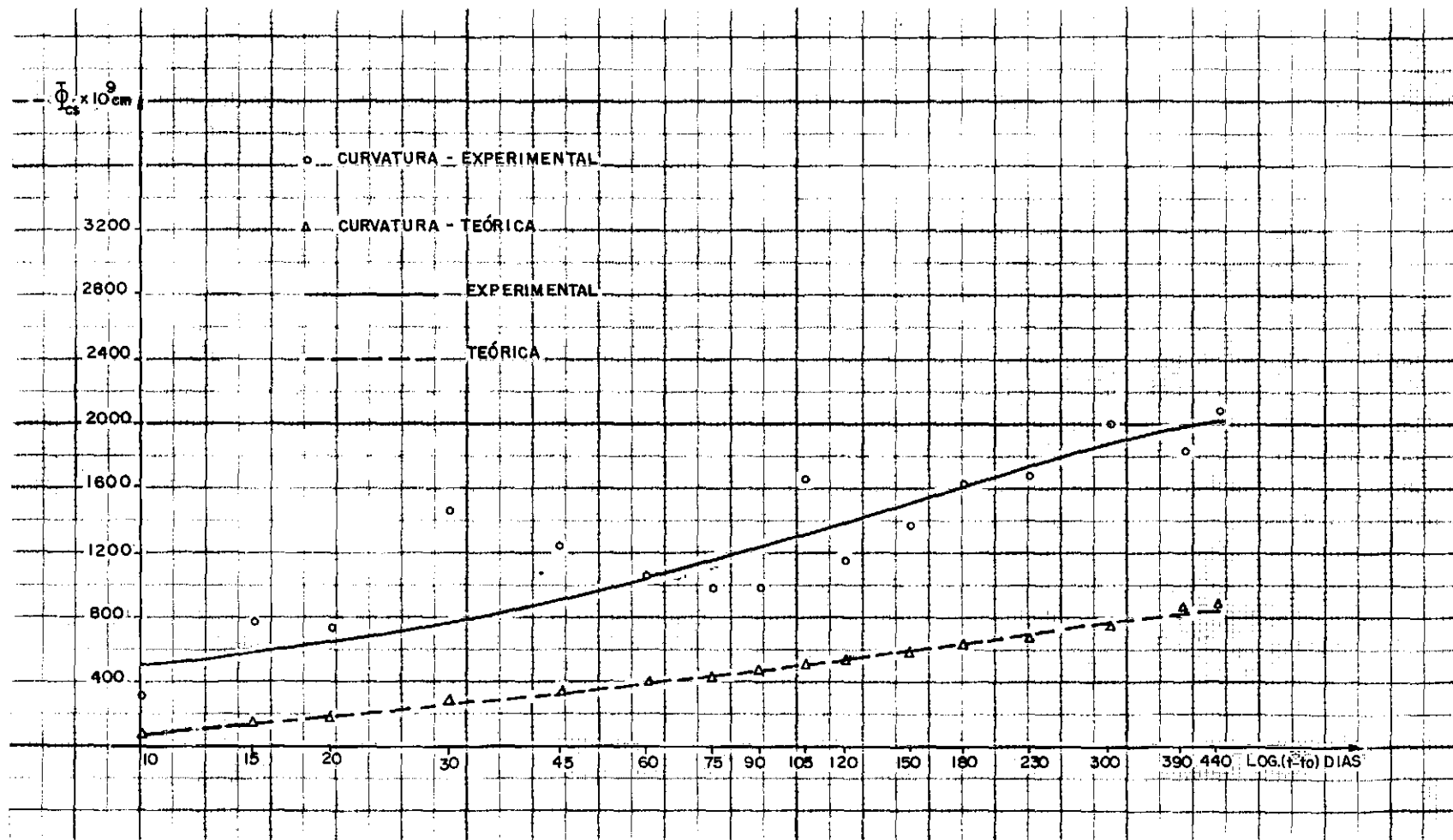


FIG. V.5. - Evolução das curvaturas experimental e teórica

Modelo M2 - CADA

### 5.3. Resultados Experimentais do modelo M7

#### 5.3.1. Tabela de deformações específicas

Na tabela V.1. são apresentadas as deformações específicas superficiais médias, em três seções verticais: SV2, SV4 e SV5, para sete valores de  $(t - t_0)$ , onde  $t_0$  é a idade correspondente ao início das leituras:  $t_0 = 8$  dias. Na seção SV2 e SV4 foi considerada a média das deformações lidas nos 4 pontos de medição simétricos entre si:  $E_i$ ,  $D_i$ ,  $ES_i$  e  $DS_i$ , para cada nível horizontal. Na seção SV5 considerou-se a média das deformações lidas nos 2 pontos simétricos:  $E_i$  e  $D_i$ , para cada nível horizontal. Esses valores não sofreram correção devido à influência da variação da temperatura da água, são valores brutos. Apresentamos também nesta tabela os devidos valores da temperatura da água para cada idade.

As deformações longitudinais totais medidas neste modelo foram desprezadas, pois a peça de apoio do defômetro COPPE foi chumbada no concreto em posição incorreta.

#### 5.3.2. Evolução da expansão nas seções verticais: SV2, SV4 e SV5, até a idade $(t-t_0) = 440$ dias

Na figura V.6. é mostrada a curva da expansão sofrida pelo modelo M7 ao longo do tempo. Os pontos de cada seção vertical, são a média das deformações lidas em cada nível horizontal. Traçamos somente uma curva média representativa das deformações nas três seções verticais.



T A B E L A - V.1.

RESULTADOS DO MODELO M7 - SAAS

$\epsilon_{\text{csm}}$  - Deformações específicas superficiais médias (expansão)

$\epsilon$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	SEÇÃO	SV2							SV4							SV5						
	$\begin{matrix} (t-t_0) \\ \text{dias} \end{matrix}$ NÍVEL	30	60	90	120	180	390	440	30	60	90	120	180	390	440	30	60	90	120	180	390	440
$\epsilon_{\text{csm}}$	SH1	86	95	143	119	112	133	122	66	85	141	114	101	118	114	78	84	146	104	92	120	110
	SH2	70	89	128	115	96	128	118	79	97	143	121	100	127	122	78	104	154	124	110	106	126
	SH3	76	84	125	111	95	130	121	72	81	118	108	83	116	108	62	68	98	86	82	112	124
	SH4	81	97	135	124	105	147	141	52	81	95	106	79	100	102	68	88	100	100	84	86	120
$\epsilon_{\text{csm}}$ (média)		78	91	133	117	102	135	123	67	86	124	112	91	115	112	72	86	125	104	92	106	120
Temperatura (°C)		23	-	24	26	27	23	26	23	-	24	26	27	23	26	23	-	24	26	27	23	26

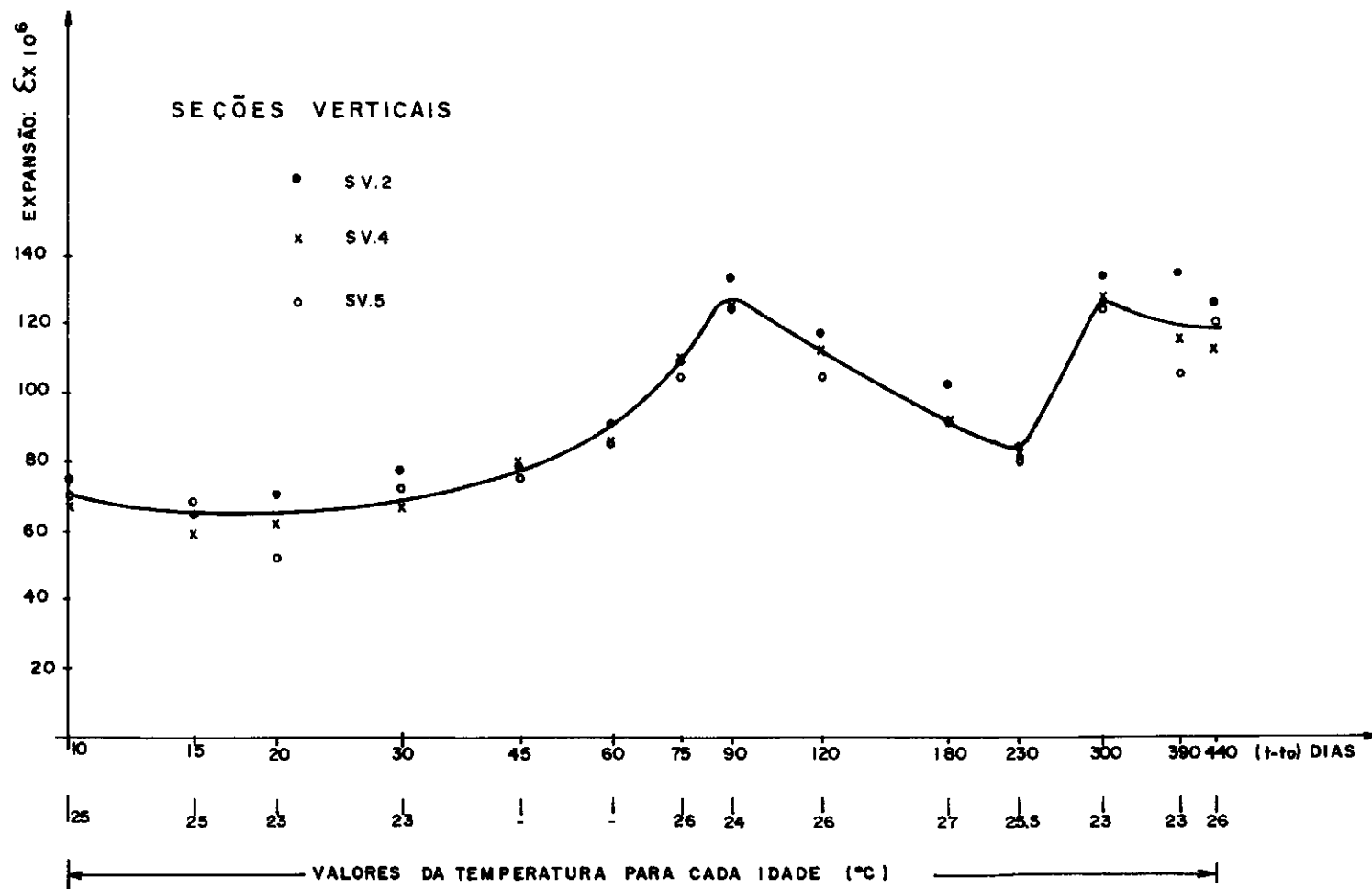


FIG.V.6 - EVOLUÇÃO DA EXPANSÃO NAS SEÇÕES VERTICAIS: SV2, SV4 E SV5

## CAPÍTULO VI

## VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1. Resultados apresentados nas tabelas

Os resultados experimentais apresentados nas tabelas dos grupos A e B, evidenciam a influência da variação da temperatura do meio ambiente ao longo das medições. A figura V.1. mostra ter havido variações significativas da temperatura e da umidade do local de ensaio.

O defômetro D250, com o qual se obteve  $\epsilon_{\text{csm}}$  é muito pouco sensível a variações de temperatura, porém as leituras realizadas com o mesmo são afetadas diretamente em função da variação de temperatura, com relação à temperatura para a idade  $t_0 = 9$  dias. A expressão seguinte obtida da equação V.2. mostra claramente esta influência.

$$\epsilon_{\text{corrigido}} = \epsilon_{\text{aparente}} - \alpha_m \Delta T$$

Como os valores das tabelas do grupo A são todos negativos, os valores corrigidos apresentados nas tabelas do grupo B são sempre maiores em valor absoluto para variações de temperatura positivas ( $\Delta T > 0$ )

O defômetro COPPE, construído com aço inoxidável, tem um coeficiente de dilatação linear térmica aproximadamente igual ao do concreto. Assim, as medições realizadas com o mesmo não são significativamente afetadas pelas variações de temperatura ambiente, e deveriam ser corrigidas apenas com relação a problemas mecânicos como montagem e desmontagem de defletômetro (equação V.3.). Entretanto, como já foi explicado no

item 5.2.1., a deformação aparente do gabarito deveu-se a um amassamento progressivo do mesmo, optando-se então por considerar  $L_g = 0$  e não efetuar nenhuma correção nas deformações específicas longitudinais médias obtidas com o defômetro COPPE.

Apesar das correções efetuadas, os valores apresentados nas tabelas do grupo B ainda apresentam-se influenciados pelas condições ambientais. Pode-se perceber isso verificando-se que nas tabelas do grupo B tem-se quase sempre .....  $\Delta \epsilon_{\text{CSM}} (60 \rightarrow 120 \text{ dias}) < \Delta \epsilon_{\text{CSM}} (120 \rightarrow 180 \text{ dias})$ , o que é incoerente, verificando-se ainda que para os modelos M4 e M5 ocorrem alguns casos de  $\epsilon_{\text{CSM}}(120 \text{ dias}) < \epsilon_{\text{CSM}}(90 \text{ dias})$ .

Os valores de  $\epsilon_m$  apresentam-se também influenciados pela variação das condições ambientais pois encontram-se casos de  $\Delta \epsilon_m (60 \rightarrow 120 \text{ dias}) < \Delta \epsilon_m (120 \rightarrow 180 \text{ dias})$ .

No termo-higrógrafo foram registradas variações bruscas da umidade relativa do ar ao longo do dia, tendo-se verificado variações de até 10% de umidade relativa num período de 4 horas, enquanto que a temperatura permanecia praticamente constante.

Os resultados apresentados nas tabelas mostram que:

- $\epsilon_{\text{CSM}}$  diminui de cima para baixo no modelo M6 -- SAAN (sem armadura) evidenciando uma influência da técnica de apoio dos modelos. A face apoiada sofre uma restrição ao deslocamento e uma restrição à perda de umidade, o que reduz a retração. Nos demais modelos esse efeito também se manifesta, mas é mascarado pela presen-

ça da armadura, cuja restrição à livre retração do concreto é maior do que a do apoio.

- $\epsilon_{\text{CSM}}$  diminui das extremidades para o centro dos modelos (seção SV5). Observou-se, entretanto, que nos modelos M1, M2 e M3, ao nível das armaduras, esse comportamento não se verifica, pois as seções nas extremidades dos modelos sofrem uma maior distorção devida à armadura do que na região central.
- No modelo M6 - SAAN (sem armadura) encontramos  $\Delta\epsilon_{\text{CSM}} (60 \rightarrow 120 \text{ dias}) < \Delta\epsilon_{\text{CSM}} (120 \rightarrow 180 \text{ dias})$  e  $\Delta\epsilon_m (60 \rightarrow 120 \text{ dias}) > \Delta\epsilon_m (120 \rightarrow 180 \text{ dias})$ , indicando que a resposta à variação da umidade relativa no eixo do modelo é mais lenta do que com relação à superfície. No Quadro VI.1 abaixo apresentamos valores das deformações superficiais (níveis SH1 e SH4) e axiais, para determinadas idades, o que evidencia o comportamento acima citado.

QUADRO VI.1.

$\epsilon_{\text{CSM}}$  - Deformações específicas superficiais

$\epsilon_m$  - Deformações específicas longitudinais (axiais)

$\epsilon$ ( $-1 \times 10^{-6}$ )	(t-to) NÍVEL	15	30	45	60	75	90	105	120	150	180	230	300	390	440
$\epsilon_{\text{CSM}}$	SH1	83	123	145	186	197	207	208	232	308	313	344	388	404	385
	SH4	53	85	101	126	127	137	142	154	244	245	276	294	324	314
$\epsilon_m$	EIXO	61	105	114	151	174	204	221	226	271	290	305	343	380	393

A perda de umidade pela superfície estabelece um gradiente de umidade na peça de concreto, o qual provoca uma retração não - uniforme ao longo da seção transversal da peça de concreto. Transcrevemos, a seguir, as figuras 9.18 e 9.19 apresentadas por A. de Sousa Coutinho [11], as quais se baseiam na teoria da difusão de Newton, para um dado coeficiente de difusão. Obtemos, então, como consequência desta teoria, a de que a peça de concreto fica sujeita a uma retração diferencial com a superfície sendo tracionada e o centro comprimido (a parte central da peça funciona como uma armadura fictícia).

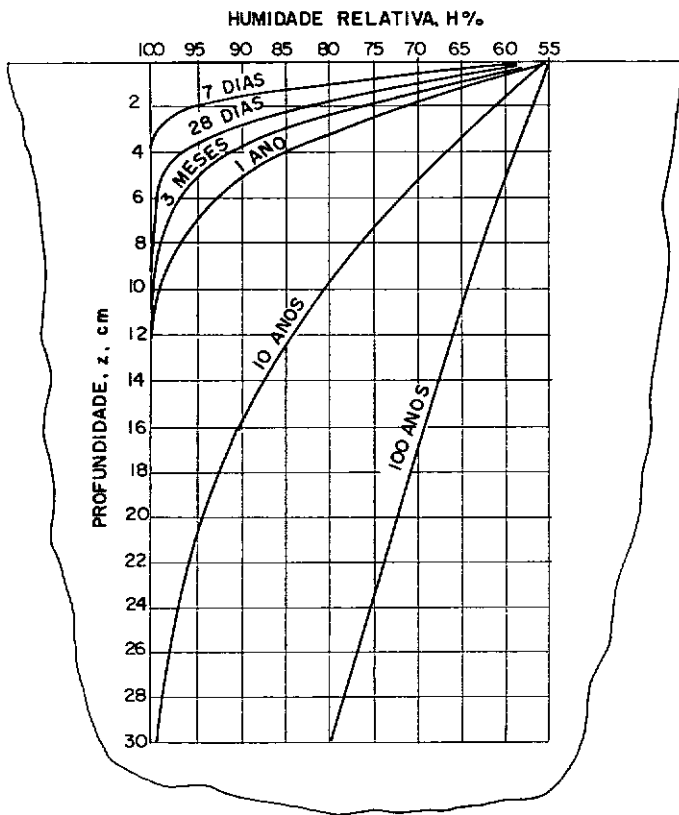


Fig. 9.18 - Distribuição de umidade num maciço de betão semi - indefinido secando pelo plano limite numa atmosfera de 55% de umidade relativa. Máxima dimensão do inerte, 25mm; dosagem de cimento, 200kg/m<sup>3</sup>; dosagem de água 150 l/m<sup>3</sup>. Coeficientes de difusão dados na curva 5 da fig. 9.17. Para 10 e 100 anos considerou-se o coeficiente igual ao de 1 ano.

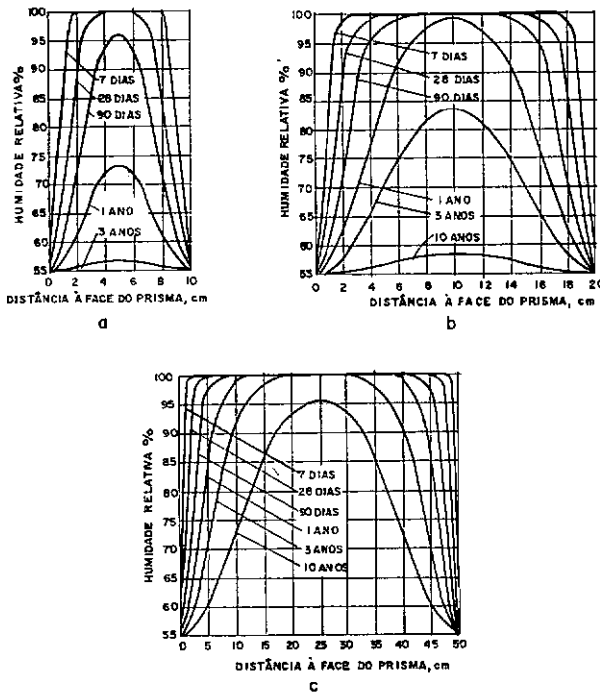


Fig. 9.19 - Distribuição de humidade em prismas quadrangulares de betão com as quatro faces laterais expostas a secagem, no caso do coeficiente de difusão  $\rho = 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$ , colocados em 55% de humidade relativa. (a) Prisma com a secção de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . (b) Prisma com a secção de  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . (c) Prisma com a secção de  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ .

FIG. VI.2. - Cópia da Fig. 9.19 de [11]

Tentando-se verificar a influência da variação da umidade relativa nas deformações do concreto (retração e expansão), realizamos medição de deformação em dois corpos de prova cilíndricos (Diâmetro = 150mm e altura = 300mm) durante um período de aproximadamente de 120 dias. Inicialmente os corpos de prova encontravam-se sob a placa de reação do Laboratório de Estruturas da COPPE, nas condições ambientais: temperatura média de 25 °C e umidade relativa média de 75%. Usando ainda uma caixa d'água ( $T_{\text{médio}} = 21,5 \text{ °C}$  e  $H = 100\%$ ) e a Sala de Reologia



do Laboratório de Estruturas ( $T_{\text{médio}} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $H_{\text{médio}} = 47\%$ ), ficamos com três ambientes distintos, nos quais foram realizadas as medições. Os corpos de prova apresentavam uma secagem prévia de 3 anos quando foram iniciadas as medições, as quais foram feitas em duas geratrizes diametralmente opostas, com o extensômetro mecânico Defôrmetro D250, com base de medição 250 mm, sendo tomada a média das deformações lidas. Os resultados obtidos estão apresentados na fig. VI.3.

Em [11] é apresentada a fig. 9.14 devida as pesquisas de L'Hermite e outros, onde encontramos a influência dos ciclos alternados de secagem e embebição na retração de espécimes prismáticos de concreto. Na fig. VI.4. apresentamos cópia da figura 9.14.

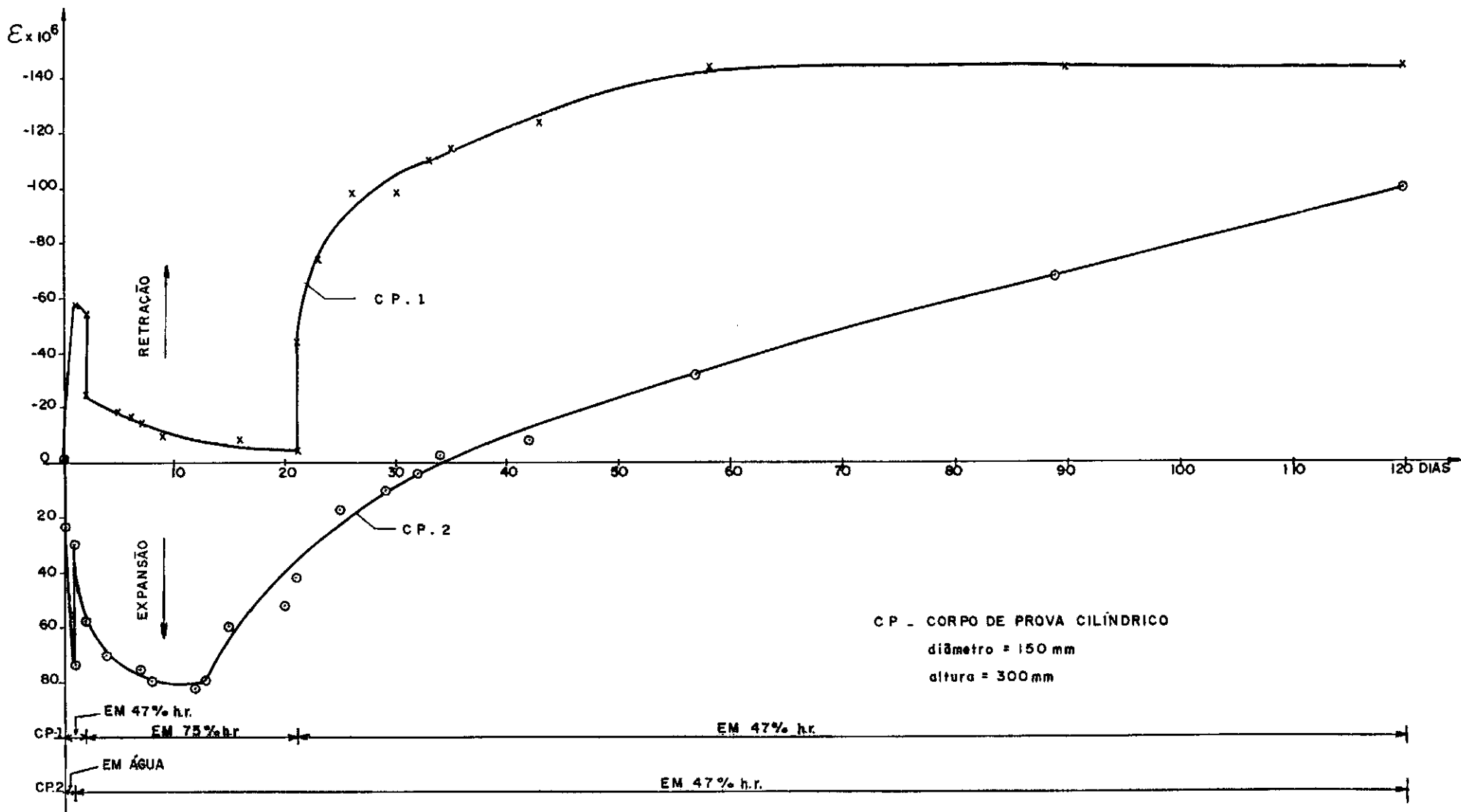


FIG. VI.3 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE UMIDADE RELATIVA NA RETRAÇÃO DO CONCRETO DEPOIS DE SECAGEM PRÉVIA DE 3 ANOS EM AMBIENTE NORMAL ( 75 % h.r.)

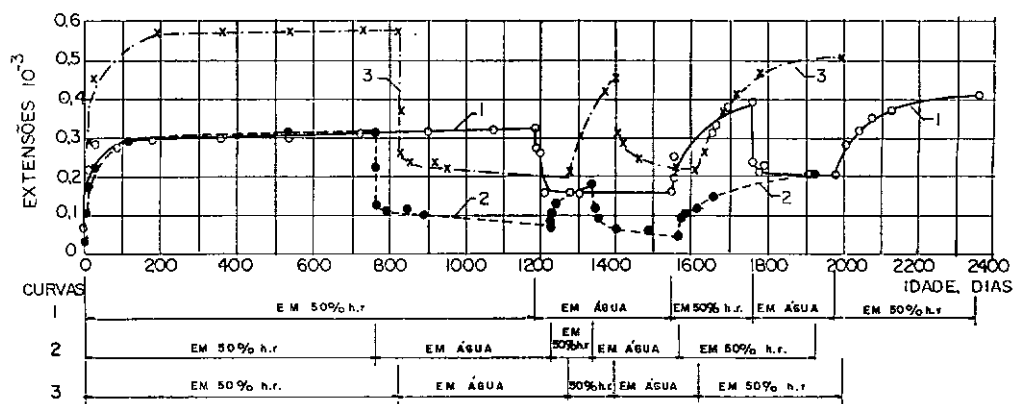


Fig. 9.14. - Influência da secagem e embebição na contração. Espécimes prismáticos com  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ ; dosagem de cimento,  $350 \text{ kg/m}^3$ . 1 - Inerte rolado; areia, 60% da totalidade do inerte; dosagem de água,  $203 \text{ l/m}^3$ . 2 - Inerte quartzoso; areia, 36% da totalidade do inerte; dosagem de água,  $133 \text{ l/m}^3$ . 3 - Inerte calcário; areia 36% da totalidade do inerte; dosagem de água,  $140 \text{ l/m}^3$  (9.18)

- $\epsilon_m$  medido no aço é praticamente igual a  $\epsilon_m$  medido no concreto, no mesmo nível horizontal, comprovando a hipótese de aderência perfeita entre o aço e o concreto [1].
  - $\epsilon_{csm} \gg \epsilon_{teor.}$  para o modelo M6 (sem armadura).
  - $\epsilon_m > \epsilon_{teor.}$  para o modelo M6 (sem armadura).
  - Os resultados experimentais ( $\epsilon_{csm}$  e  $\epsilon_m$ ) dos modelos com armadura, apresentam-se, na maioria dos casos, superiores aos teóricos ( $\epsilon_{teor.}$ ), mesmo sem levar em conta a restrição do apoio.
- $\epsilon_{teor.}^* < 0,5 \epsilon_{teor.}$  no modelo M6 (sem armadura), cabendo observar que o coeficiente  $\lambda$ , introduzido pelo CEB/78, tem bastante influência no valor de  $\epsilon_{teor.}^*$  porque aumenta a espessura fictícia  $h_0$ , reduzindo, assim, a retração total  $\epsilon_{s0}$  e afetando, principalmente, a evolução da retração ao longo do tempo ( $\beta_s(t, h_0)$ ). O gráfico da figura VI.5, obtido da figura e.1. do CEB/78, fornece a variação dos coeficientes  $\lambda$  e  $\epsilon_{s1}$  com a umidade do ambiente.
- Para o modelo M1 - CAS, as leituras  $\epsilon_{csm}$ , no nível SH1, são maiores do que as correspondentes no modelo M6 (sem armadura), indicando que houve uma zona de compressão na seção transversal deste modelo (a seção é cortada pela linha neutra), devida ao fato de ser um modelo com armadura simples. Vale ressaltar que todos os cálculos teóricos referentes a este modelo fo

ram efetuados considerando a armadura superior existente (porta-estribos) - 2Ø 4.8mm.

Cabe ainda ressaltar que os resultados experimentais apresentados contêm um erro de aproximadamente  $\pm 20 \times 10^{-6}$ , inerente ao instrumento de medição na posição em que foi utilizado.

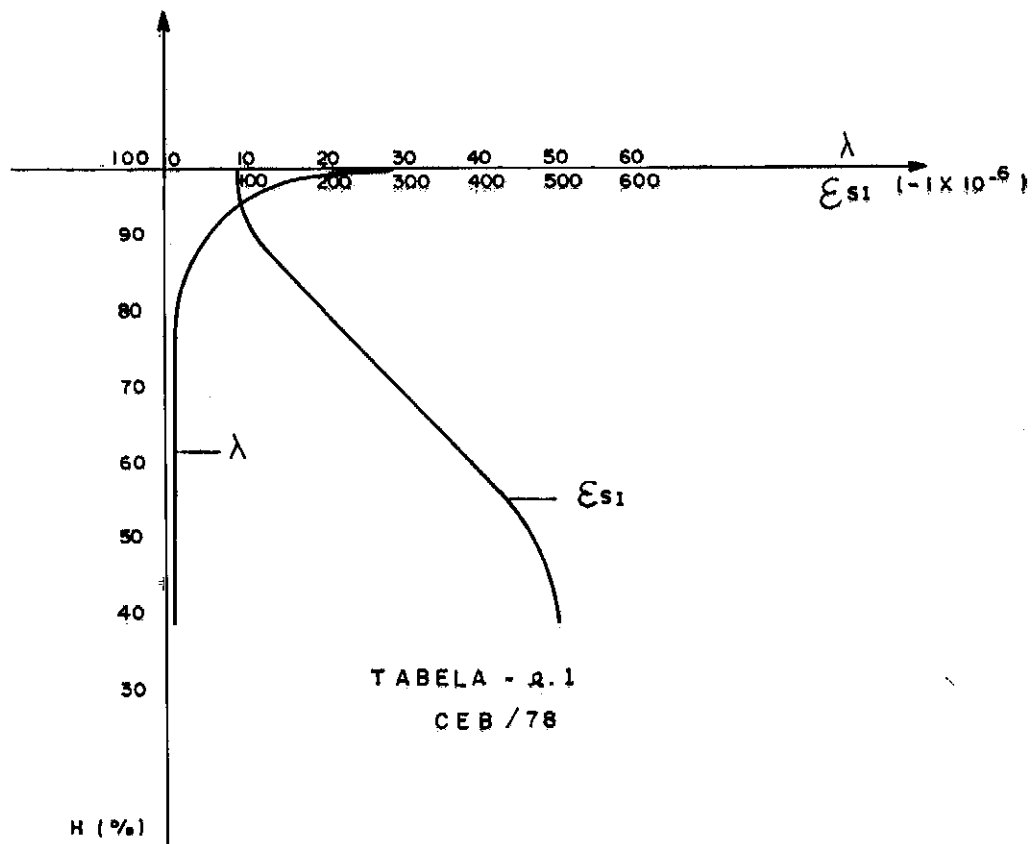


FIG. VI.5 - VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES  $\lambda$  E  $\epsilon_{s1}$  COM A UNIDADE

6.2. Resultados apresentados nos gráficos da figura V.2.

Os gráficos da figura V.2. mostram o comportamento das seções verticais SV2, SV4 e SV5 para 6 idades. Não foi apresentado o comportamento da seção vertical SV1 pelo fato desta seção ter sido bastante influenciada pelos efeitos de extremidade, como também por questão de uniformidade de resultados, já que para essa seção as leituras foram feitas com defômetro Tensotast e não o D250. E quanto à seção SV3, esta devido ter apresentado um comportamento intermediário às seções SV2 e SV4, sem grande interesse. Entretanto, cabe observar, que os valores de  $\epsilon_{\text{csm}}$  na seção SV1 foram maiores do que na seção SV2, ressaltando a distorção das seções devido aos efeitos de extremidade.

Da análise desses gráficos observamos que:

- Os efeitos de extremidade foram significativos e prejudicaram a análise relativa à hipótese das seções planas adotada em [1]. Ficou evidente que próximo às extremidades tal hipótese não se verifica, nada se podendo afirmar, entretanto, para seções longe das extremidades no caso de modelos mais compridos, pois os modelos ensaiados são curtos.
- A seção vertical SV2 do modelo M6 apresenta uma curvatura côncava para o eixo dos  $\epsilon$  nas primeiras idades, e que ao longo do tempo esta curvatura tende a desaparecer. Este comportamento evidencia a existência de um gradiente

de umidade na seção transversal da peça (nú  
cleo da peça funcionando como armadura fictí  
cia).



6.3. Resultados apresentados nos gráficos da figura V.3.

Pode-se observar nesses gráficos que, para a seção SV5:

- Os valores experimentais da retração livre ocorrida no modelo M6 (sem armadura), são superiores aos teóricos. Este comportamento sugere que os valores experimentais da retração aparente (ocorrida nos modelos com armadura), deveriam, também, ser maiores do que os teóricos. Entretanto, nos modelos M4 e M5 as retrações aparentes não foram muito diferentes dos valores teóricos, até a idade  $(t-t_0) \approx 100$  dias, o que indica que o coeficiente  $\beta_6^*$ , usado na teoria, pode estar sendo superior ao que deveria ser. Por outro lado, após essa idade os resultados parecem mais coerentes, com relação à situação do modelo M6 (resultados experimentais > resultados teóricos). É de se supor, então, que deveria haver alguma modificação na equação que fornece a retração aparente, com fins de adequação à curva experimental obtida.
- As peças armadas apresentam a retração aparente junto das armaduras não tão superior do que os valores teóricos. Entretanto, longe das armaduras verifica-se que estes valores são superiores aos teóricos, indicando a influência do empenamento da seção.

- Existe a influência da porcentagem de armadura no valor da retração aparente, principalmente para os modelos M4 e M5 em relação aos demais.
- Comparando as curvas experimentais dos modelos M1 (armadura simples) e M6 (sem armadura), fica evidente, também, a influência da posição da armadura na retração. Nota-se que a retração aparente do modelo M1 é superior à retração livre do modelo M6 no nível SH1, confirmando que a armadura simples dá origem a uma curvatura devida à retração do concreto, surgindo uma zona comprimida no lado oposto ao da armadura.

6.4. Resultados apresentados nos gráficos da figura V.4.

Os gráficos da figura V.4. apresentam a evolução das tensões de compressão nas armaduras na seção SV5, para a qual adotamos  $\epsilon_{aço} = \epsilon_{conc.} =$  retração aparente. Ressalvamos que devido à distorção das seções de extremidade, não se adotou  $\epsilon_{aço} = \epsilon_{conc.} =$  retração aparente para estas seções, pois teríamos tensões na armadura nas seções de extremidade (SV1, principalmente) superiores às tensões na SV5, o que seria uma incoerência.

Da análise desses gráficos observamos que:

- Os valores das tensões experimentais mostram-se quase sempre superiores aos valores teóricos. Cabe aqui, entretanto, as mesmas considerações feitas com respeito ao coeficiente  $\beta_6^*$  e aos valores das retrações aparentes após a idade  $(t-t_0) \cong 100$  dias, nos modelos M4 e M5.
- O modelo M1 - CAS (com armadura simples) no nível SH1, é o que apresenta maior valor para a tensão de compressão na armadura ( $\sigma'_{s1} > 90 \text{ N/mm}^2$ ), o que se deve ao fato de a armadura superior (porta-estribos -  $2\phi 4.8 \text{ mm}$ ) estar numa zona de concreto comprimido (único modelo onde encontramos uma zona comprimida no concreto).
- Os modelos M4 e M5 são os que apresentam menores valores para as tensões de compressão nas armaduras, mas por outro lado são os que apre

sentam maiores valores para as tensões de tração no concreto. As figuras VI.5 seguintes mostram a evolução dessas tensões de tração no concreto, cujos valores experimentais foram calculados com a expressão:

$$\sigma_c(t) = \rho \cdot \sigma_s'(t)$$

a qual foi obtida a partir da equação de equilíbrio

$$F_s'(t) = F_c(t) \quad (\text{auto-equilibradas})$$

onde:

$F_s'(t)$  - força total que atua na armadura

$F_c(t)$  - força total que atua no concreto

e da hipótese de que as tensões na armadura e no concreto se distribuem uniformemente.

Vale ressaltar que os valores de  $\sigma_s'(t)$  adotados, são valores experimentais médios obtidos dos valores encontrados nos níveis SH1 e SH4.

Podemos, então, observar na figura VI.6., para o modelo M5 (maior porcentagem de armadura) que a resistência à tração do concreto não foi atingida ( $f_{ctm} = 2,8 \text{ N/mm}^2$  aos 28 dias).

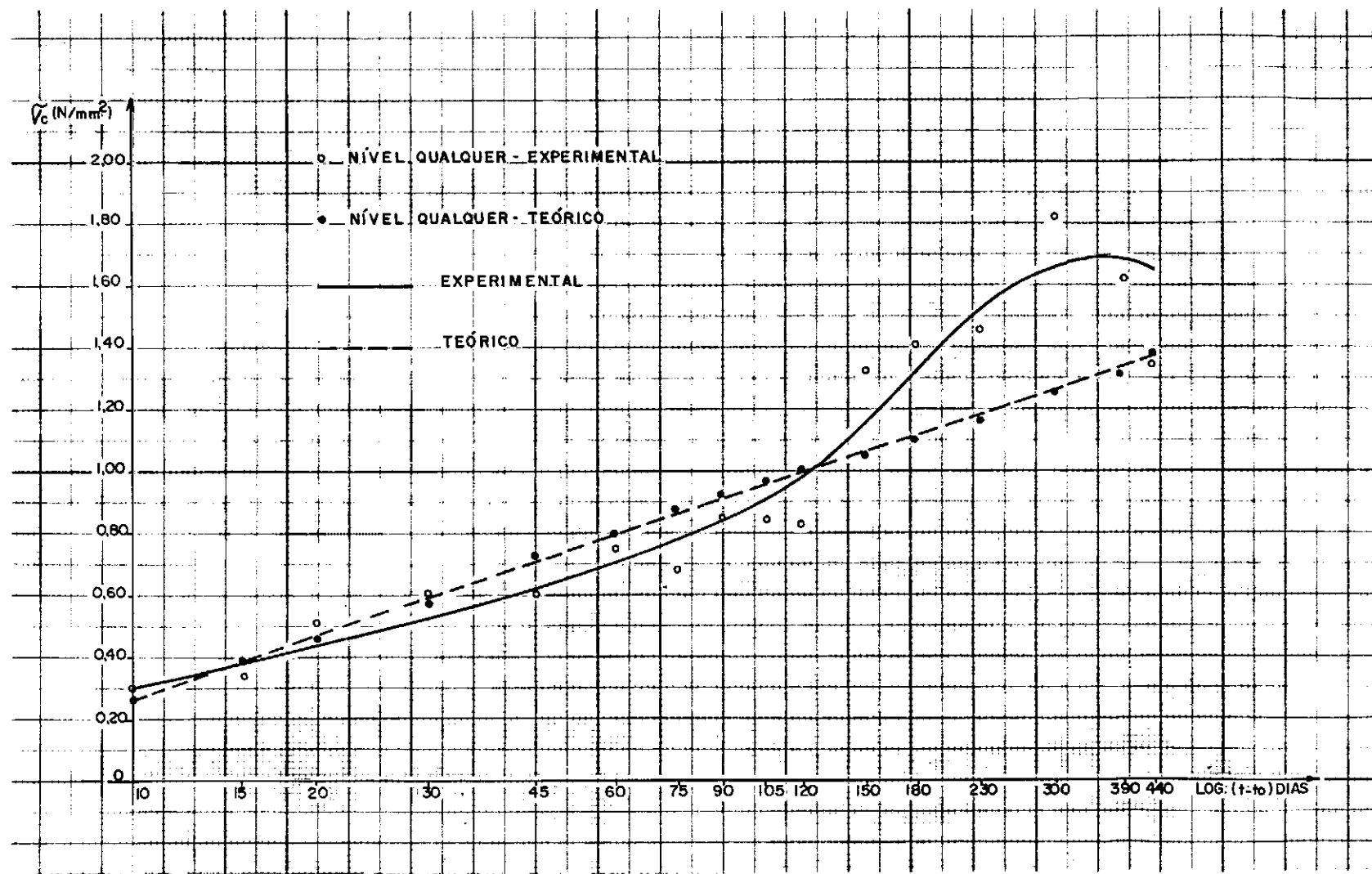


FIG. VI.6. - Evolução das tensões (teórica e experimental) no concreto na seção SV5

Modelo M4 - CAP1

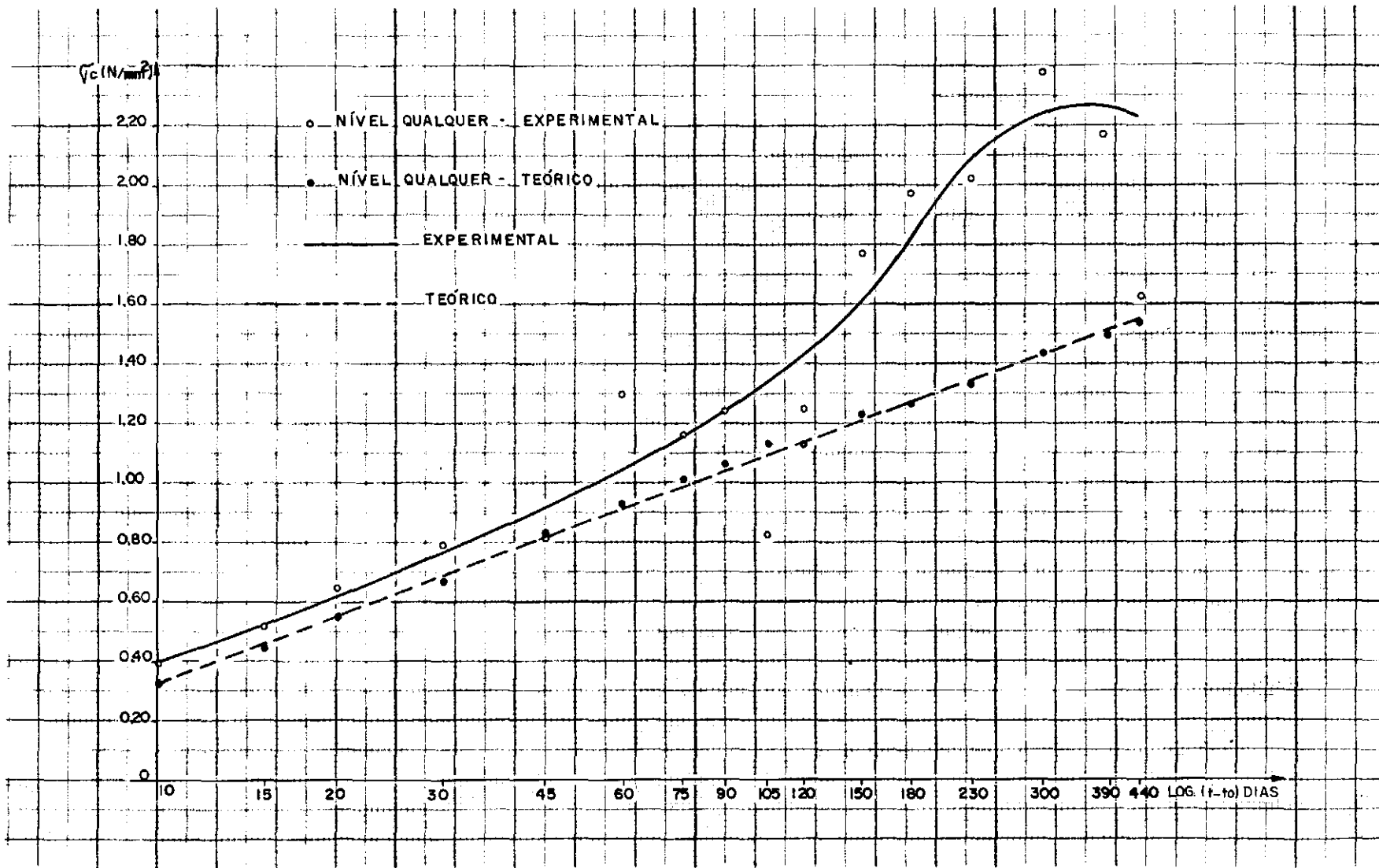


FIG. VI.6. - Evolução das tensões (teórica e experimental) no concreto na seção SV5

Modelo M5 - CAP2

6.5. Resultados apresentados na figura V.5.

As figuras V.5. mostram que:

- as curvas experimentais das curvaturas são sempre superiores às teóricas;
- a distribuição das armaduras influi na curvatura da peça, pois o modelo M1 - CAS (com armadura simples:  $\rho_1 = 1,43\%$  e  $\rho_2 = 0,03\%$ ) sofreu uma maior curvatura do que o modelo ..... M2 - CADA (com armadura dupla assimétrica:  $\rho_1 = 1,94\%$  e  $\rho_2 = 0,97\%$ ).

## 6.6. Resultados do Modelo M7 - SAAS

Os resultados deste modelo são valores médios obtidos de valores em vários pontos simétricos com referência às leituras para  $t = 8$  dias. Estas leituras de referência não foram as iniciais ( $t_0 = 7$  dias), pois o modelo já permanecia umas 16 horas dentro d'água. As primeiras leituras foram desprezadas em virtude destas terem sido feitas com o modelo em posição incorreta (no chão). Devido a este fato foi observado uma discrepância sistemática nos resultados das leituras feitas no lado esquerdo com relação aos resultados das leituras feitas no lado direito. Os valores dos resultados das leituras do lado esquerdo foram sistematicamente superiores aos valores dos resultados das leituras do lado direito, devendo isto a uma secagem superficial (retração) ocorrida no modelo quando das leituras esquerdas de referência e que após uns 20 minutos, quando das leituras de referência do lado direito, a superfície já tinha se restabelecido desta secagem (migração da água do interior da peça para a superfície, fig. VI.3., C.P.2) e apresentava-se já em fase de expansão, dando por consequência, valores maiores para estas leituras.

Na tabela V.1. observamos que:

- A expansão evolui rapidamente nas primeiras idades. Para  $(t - t_0) = 10$  dias, temos praticamente 60% da expansão ocorrida com relação a idade superior a 90 dias. Isto indica o quanto é sensível o concreto ao fenômeno da expansão.
- Nas seções SV2 e SV5 a técnica de apoio (mode



lo colocado sobre um lençol de borracha fixo no fundo da caixa d'água) influi na expansão do modelo, pois temos valores menores para os níveis inferiores.

- Na seção SV2 verificaram-se valores um pouco superiores para a expansão com relação às outras duas seções, indicando a influência do efeito de extremidade.

E na figura V.6. podemos observar que:

- A partir de  $(t - t_0) \approx 90$  dias a expansão praticamente não aumenta, havendo dispersão nos valores em função das condições de ensaio (temperatura da água; técnica de leitura: leitores diferentes; secagem superficial em função do tempo de exposição da peça em ambiente normal, pois a mesma era retirada da caixa d'água para fins de leitura, e outros fatores).
- O valor da expansão atingida aos 3 meses de idade é de aproximadamente  $120 \times 10^{-6}$  o que corresponde praticamente ao valor usual encontrado na literatura pesquisada.
- A média dos valores lidos na seção SV2 é superior as médias das outras duas seções, indicando que há um empenamento nas seções de extremidade, ou seja: as seções centrais estão menos influenciadas pelos efeitos de extremidade.

## CAPÍTULO VII

## VII - CONCLUSÕES

Da análise dos resultados acima apresentada pode-se concluir que:

- As variações de temperatura e umidade do local de ensaio e a influência da técnica de apoio dos modelos, além dos erros de medição inerentes ao instrumento utilizado dificultam ainda mais o complexo estudo da retração do concreto. Ressalva-se, entretanto, que se pretendia observar o comportamento dos modelos nesse ambiente natural, sem controle das condições ambientais, e analisar tal comportamento com base na solução teórica adotada em [1].
- A hipótese de aderência perfeita entre o concreto e o aço, utilizada em [1] é comprovada experimentalmente.
- A hipótese das seções planas adotada em [1] não se verifica experimentalmente, ressalvando-se que os modelos são curtos e os efeitos de extremidade foram significativos prejudicando a análise relativa à hipótese acima mencionada. O ensaio de peças mais esbeltas ( $L/h > 5$ , por exemplo) poderá levar a conclusões mais significativas.

- O cálculo da retração livre do concreto de acordo com as recomendações do CEB-FIP/70/72 conduz a valores bastante inferiores aos obtidos experimentalmente, para a presente pesquisa. Os valores teóricos calculados segundo as recomendações CEB/78, muito influenciados pelo coeficiente  $\lambda$ , são ainda menores.
- O cálculo da retração aparente do concreto de acordo com a solução teórica adotada em [1], com a função de fluência do CEB-FIP/70/72, conduz a valores inferiores aos obtidos experimentalmente, sendo esta diferença influenciada pela porcentagem e distribuição da armadura. Para peças com armadura perimentral (uniformemente distribuída) e porcentagem geométrica de armadura  $\rho > 5,80\%$  os resultados teóricos se aproximam dos experimentais até uma idade de aproximadamente  $(t - t_0) = 100$  dias, a partir da qual aparece novamente a diferença acima citada. A diferença entre a retração aparente experimental e a retração aparente teórica se deve à diferença entre a retração livre experimental e a teórica e à influência do coeficiente  $\beta_{6,i}^*$ . Os resultados obtidos não permitem concluir sobre a validade da expressão de  $\beta_{6,i}^*$  apresentada em [1].

As condições não ideais em que foram realizados

os ensaios impossibilitam que se tirem conclusões definitivas sobre a validade da solução teórica apresentada em [1]. Além do ensaio de peças mais longas, pesquisas onde sejam estudadas as influências de ciclos de variação de umidade a temperatura constante, como também pesquisas sobre as influências de ciclos de variação de temperatura a umidade constante, devem ser feitas visando a obtenção da resposta do concreto simples a estas variações ao longo do tempo. Estas pesquisas devem ser feitas com modelos de dimensões próximas das de vigas normais, a fim de que os gradientes de umidade e térmico gerados no interior dos modelos reproduzam fielmente o fluxo migratório da água e as condições térmicas no interior daquelas vigas. Estas pesquisas devem ser complementadas com estudos similares em peças de concreto armado.

Acreditamos, também, que seja de grande valia, em pesquisas sobre os efeitos da retração em peças de concreto armado, a colocação de extensômetros elétricos ao longo das armaduras, a fim de se obter deformações em toda extensão das barras de aço, podendo-se desta forma traçar curva de deformações ao longo do tempo.

## B I B L I O G R A F I A

1. NAGATO. Y. - Efeitos da retração em peças de concreto com armação dupla - XVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Salvador, dezembro/76.
2. TELLES, J.C.F., HALBRITTER, A.L. e CARNEIRO, F.L.L.B. - Creep and shrinkage functions according to CEB-FIP - Matériaux et Constructions (RILEM, Vol. 11, nº 64, Juillet - Aout - 1978).
3. CEB/FIP/70/72 - Recommendations Internationales pour le Calcul et l'Exécution des Ouvrages en Béton.
4. NEVILLE, A.M. - Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1970.
5. CARNEIRO, F.L.L.B. - Conferências privadas sobre Reologia e Plasticidade em Concreto Armado e Concreto Protendido - COPPE - UFRJ, 1976.
6. NAGATO. Y. - Efeitos da retração em peças de concreto armado com seção transversal tendo um eixo de simetria e com armadura dupla assimétrica em relação ao Centróide da seção transversal, Conferência privada COPPE - UFRJ, 1976.
7. CEB/FIP - Model Code for Concrete Structures, Vol. II, 1978.
8. BRANCO, R.G.C. e NAGATO, Y. - Estudo experimental sobre os

efeitos da retração em peças de concreto armado ,  
Primeiro Colóquio Venezuela - Brasil de Engenharia  
Civil, Caracas, Venezuela, 1980.

9. SOBRAL, H.S. - Dosagem dos Concretos, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1971.
10. CARNEIRO, F.L.L.B. - Dosagem de Concretos. Rio de Janeiro, INT - 1943.
11. COUTINHO, A. de Sousa - Fabrico e Propriedades do Betão, Lisboa, LNEC, 1974.
12. NEVILLE, Adam. M. - Propriedades do Concreto. São Paulo Editora Pini Ltda. 1982.




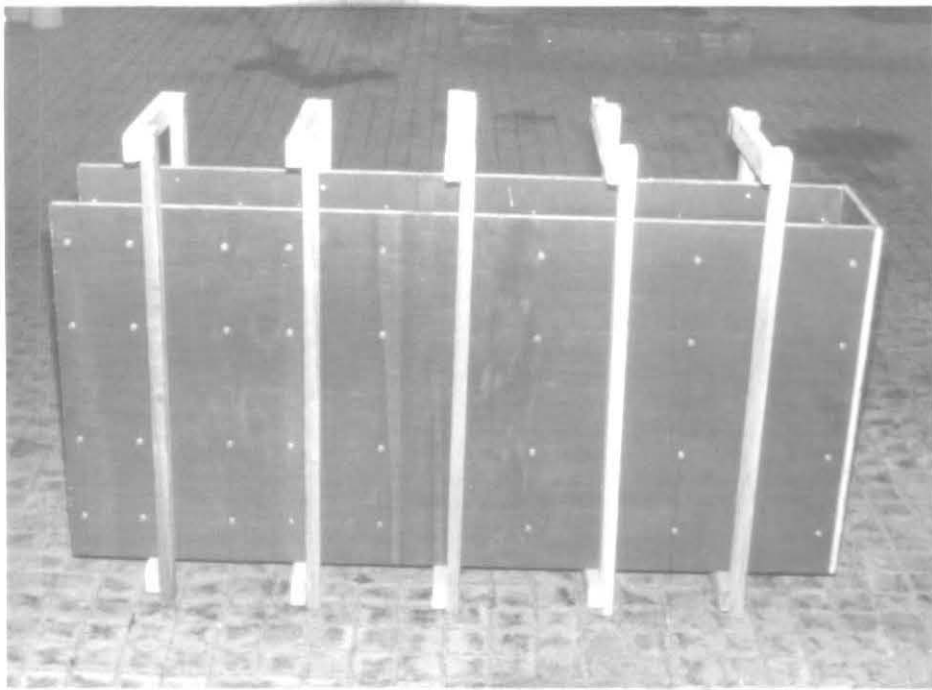
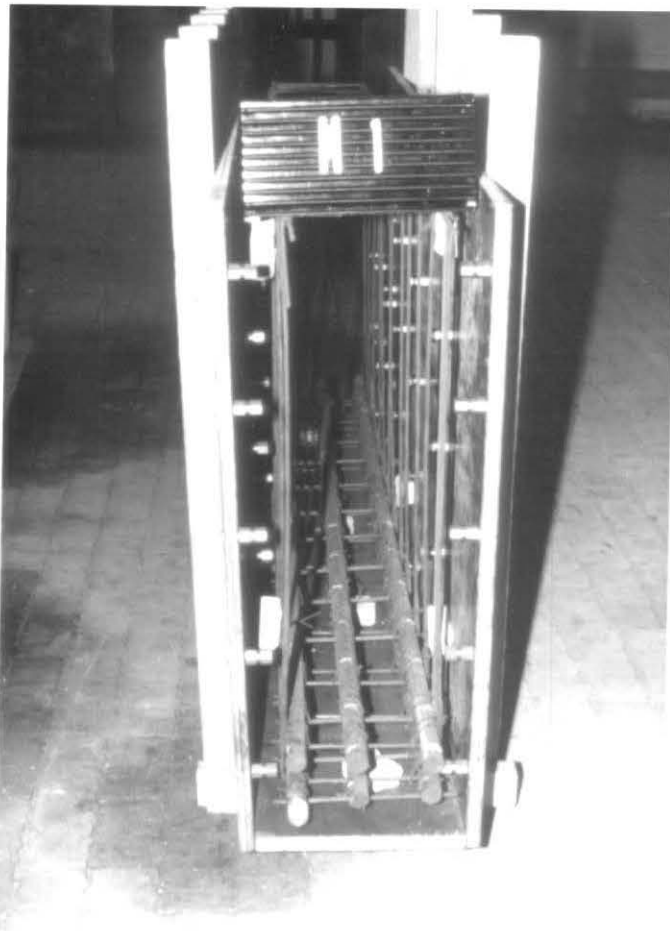


ILUSTRAÇÃO FOTOGRÁFICA



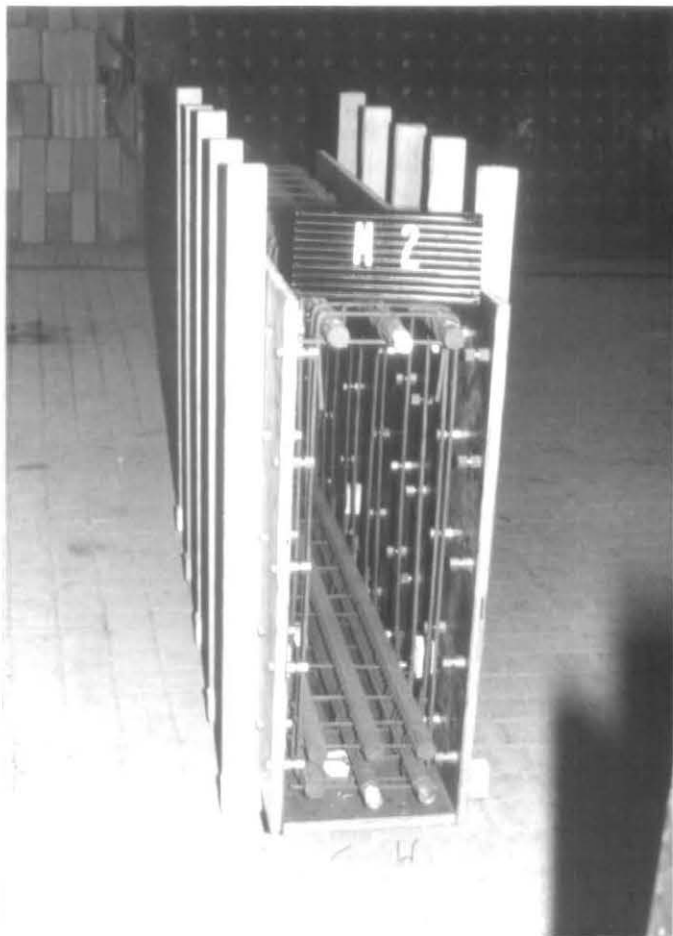
(a)



(b)

FOTO Nº 01 - a) Vista lateral da fôrma com parafusos de fixação da referência  
b) Vista frontal da fôrma do modelo M1 com referências fixadas

(a)



(b)

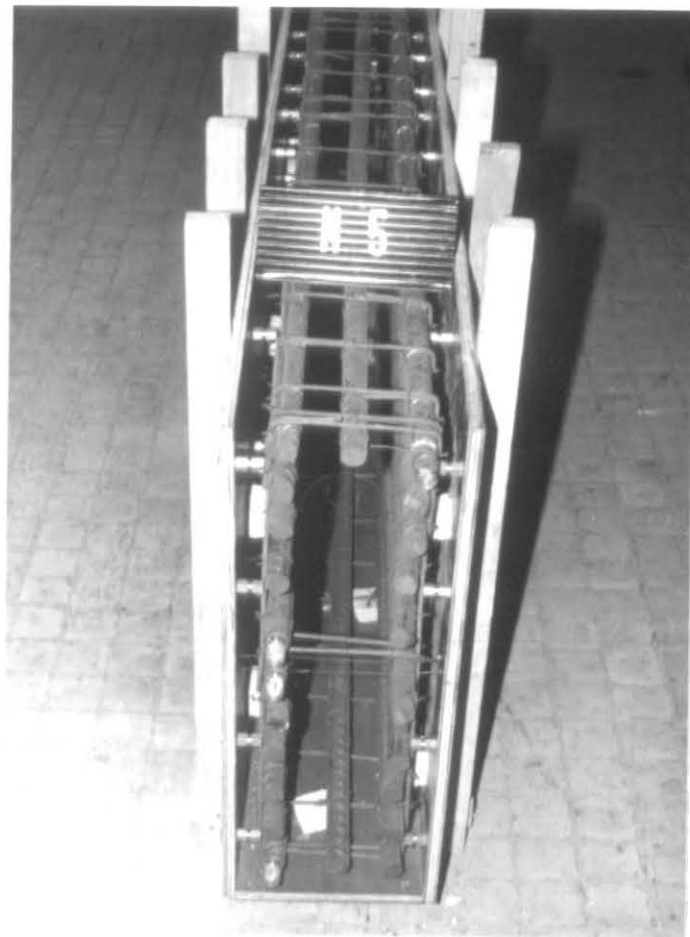


FOTO N° 02 - Detalhe das Armaduras dos Modelos M2 (a) e M5 (b)

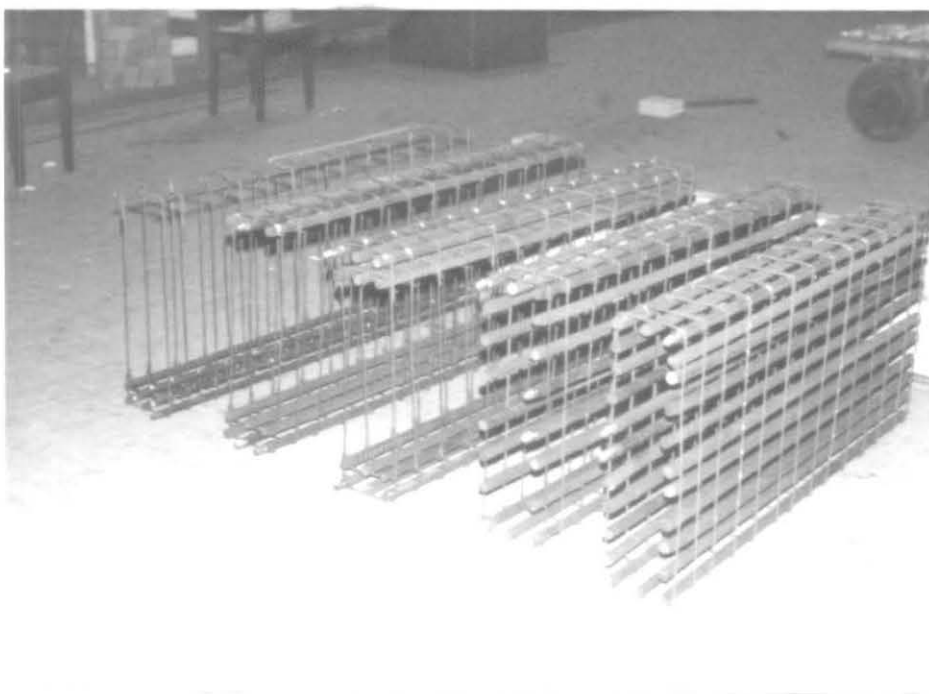


FOTO Nº 03 - Vista geral das armaduras dos Modelos



FOTO Nº 04 - Local de ensaio sob a placa de reação



(a)

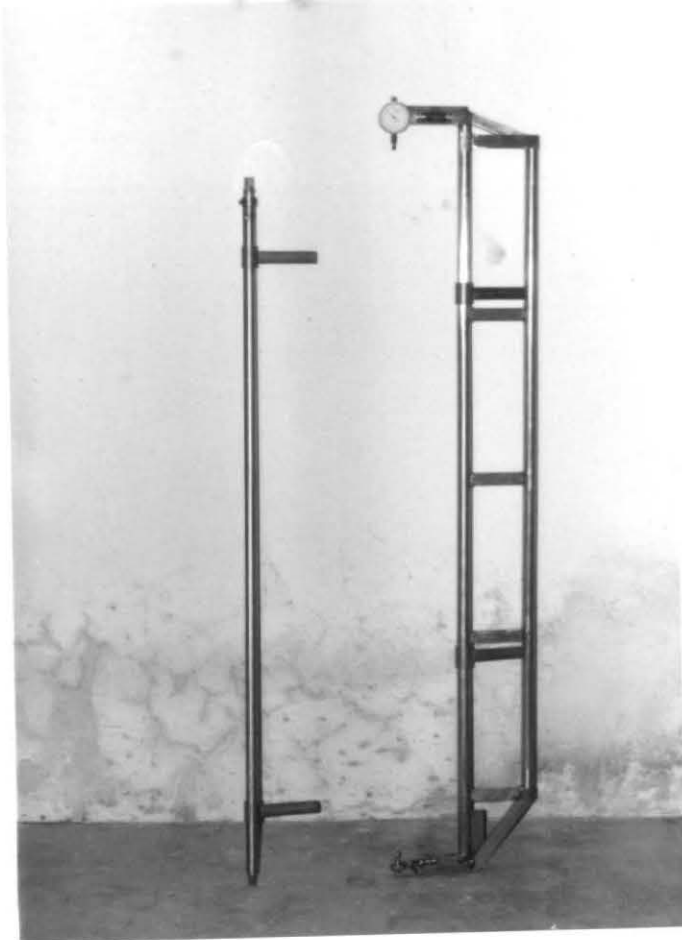


(b)

FOTO N° 05 - Técnica de Leitura: a) Defômetro D250  
b) Tensotast



(a)



(b)

FOTO Nº 6 - Defômetro COPPE: a) local de ensaio  
b) vista geral

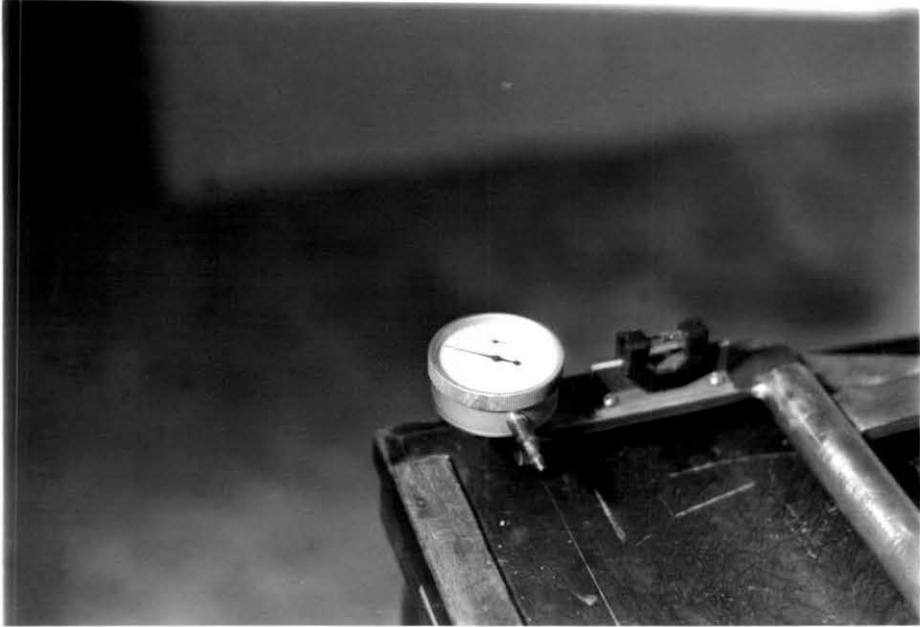


(a)

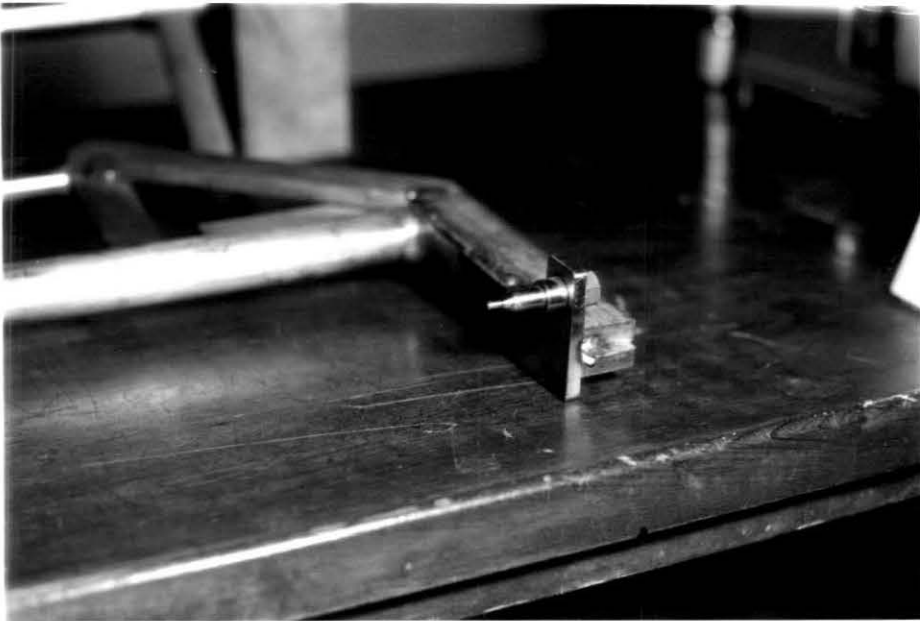


(b)

FOTO Nº 07 - Técnica de leitura com o defômetro COPPE:  
a) leitura do gabarito  
b) leitura do modelo



(a)



(b)

FOTO Nº 08 - Detalhes do defômetro COPPE:

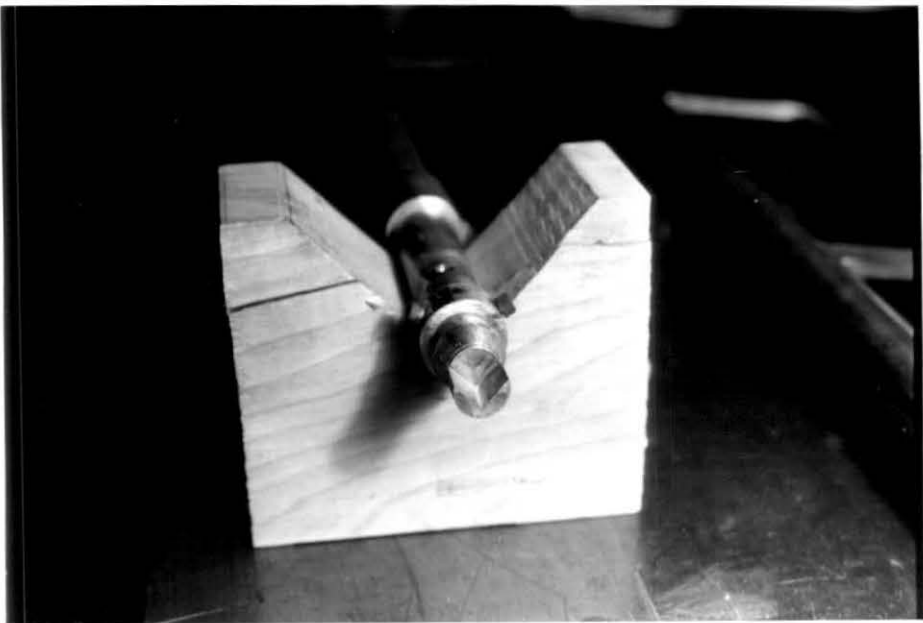
a) defletômetro e nível de bolha

b) ponta fixa de apoio





(a)



(b)

FOTO Nº 09 - Peças de apoio para o defômetro COPPE:

a) modelo

b) gabarito

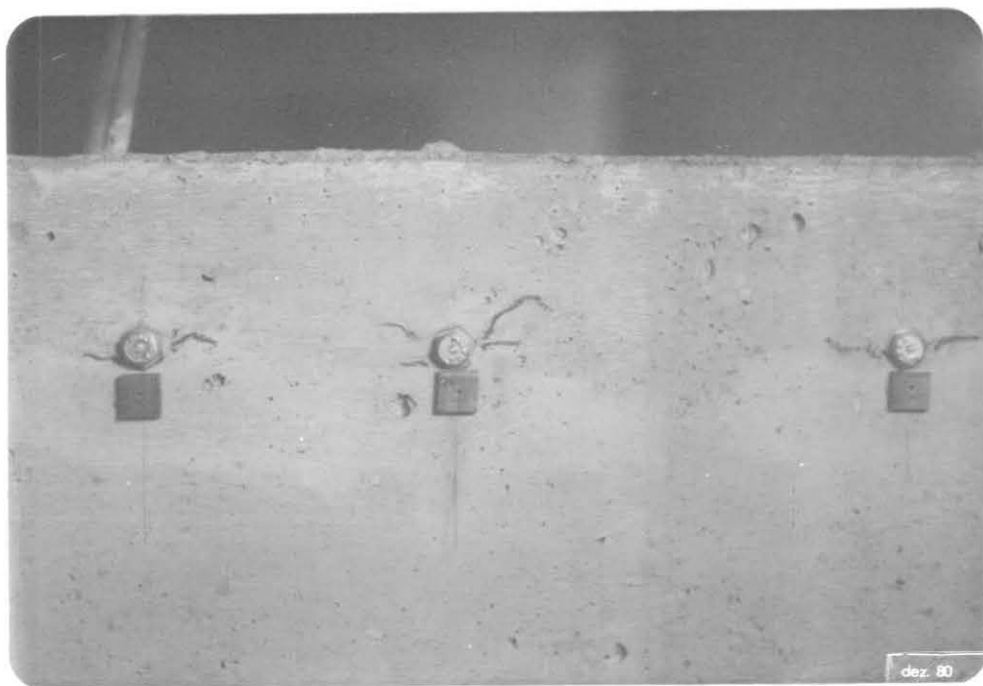
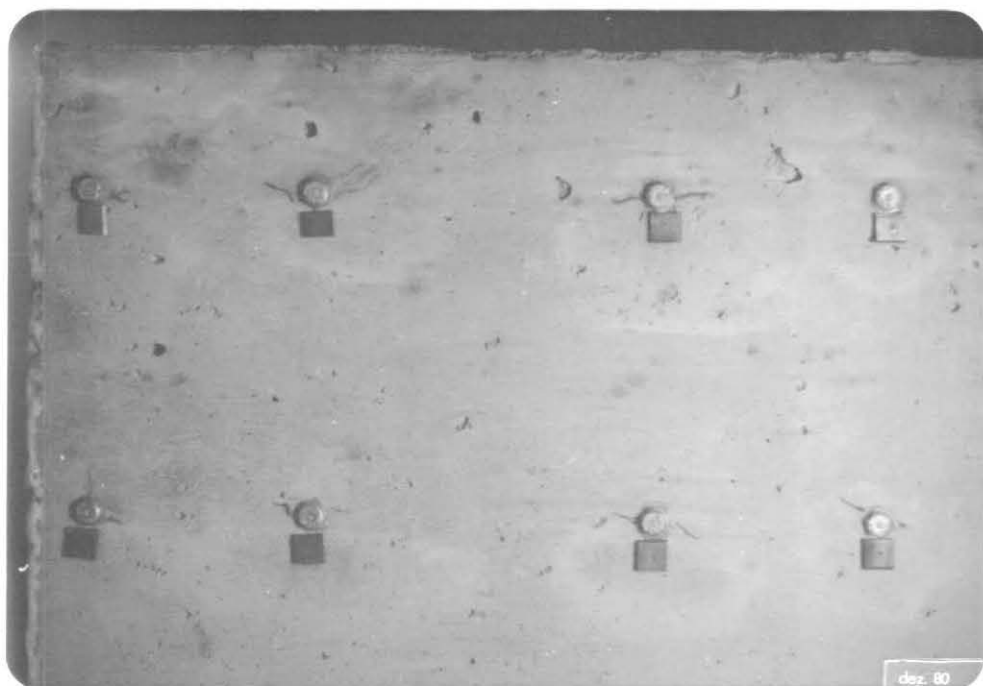


FOTO Nº 10 - Visão geral da fissuração ocorrida em torno das referências chumbadas e posicionamento das chapinhas coladas no concreto



FOTO Nº 11 - Vista geral do Modelo M7 sendo retirado da caixa d'água



FOTO Nº 12 - Vista geral dos equipamentos de medição. Em primeiro plano vemos o termo-higrôgrafo